GALILEO

Galileo y la revolución científica. Hacia la nueva ciencia

Giuseppe Morino

La revolución científica del siglo XVII fue uno de los episodios cruciales de la historia occidental. Este hito fundamental se ha entendido siempre como el triunfo de la racionalidad y el progreso frente al oscurantismo antiguo. Pero la victoria no fue fulminante, sino un proceso complejo y repleto de vaivenes: hubo avances y retrocesos, errores, indecisiones y rupturas que, aun así, terminaron por transformar el pensamiento y la mentalidad del hombre moderno, hasta la introducción de un nuevo paradigma científico y filosófico. El astrónomo, matemático y filósofo pisano Galileo Galilei (1564-1642), con su compromiso en la búsqueda de la verdad, encarna como pocos el ideal del nuevo pensador y científico.

Giuseppe Morino

Galileo y la revolución científica

Hacia la nueva ciencia

Descubrir la filosofía - 66

ePub r1.0
Titivillus 22.03.23

Título original: *Galileo e la rivoluzione scientifica: verso la scienza nuova*
Giuseppe Morino, 2018
Traducción: Silvia Freile

Editor digital: Titivillus
ePub base r2.1

Índice de contenido

Cubierta

Galileo y la revolución científica

Introducción

Filosofía y física. El peso de la tradición
- El modelo aristotélico
- El modelo atomista
- El modelo platónico
- La astronomía tradicional

La astronomía moderna
- Nicolás Copérnico
- Después de Copérnico. Brahe y Bruno
- Kepler

Galileo (I): la vida
- Galileo Galilei, En contra de llevar toga
  - La abjuración de Galileo

Galileo (II): entre física, astronomía y filosofía
- Hacia la nueva ciencia
- La física: descubrimientos y errores
- Cuestiones matemáticas
- Cuestiones físicas
- Calidad y cantidad: espacio, materia
- Cuestiones abiertas
- La condena

Isaac Newton
- Espacio, tiempo y movimiento
  - Las reglas de Newton para el correcto filosofar

APÉNDICES
- Bibliografía
  - Fuentes antiguas
  - Fuentes modernas
  - Estudios

Cronología

Notas

Introducción

En un libro de 1962, *La estructura de las revoluciones científicas*, que tuvo escaso impacto sobre la comunidad de eruditos, el historiador científico y epistemólogo Thomas Kuhn se pregunta «qué son las revoluciones científicas y cuál es la función que desempeñan en el desarrollo de la ciencia», a lo cual responde que «consideramos como revoluciones científicas aquellos episodios de desarrollo no acumulativo en los que un paradigma antiguo se ve sustituido en todo o en parte por otro nuevo incompatible con él». [1]

Las revoluciones tienen una necesidad concreta en el desarrollo científico, que, paradójicamente, proviene precisamente de su parte no acumulativa. Pues, a menudo, se presentan las ciencias duras como el conocimiento que tiene de su lado la virtud de la acumulación, en contraposición a las ciencias humanas, que, en cambio, derivan de la composición. Dicho de una forma más sencilla, en la ciencia matemático-natural el conocimiento se acumula a lo largo de una trayectoria lineal que va depositando nuevos descubrimientos sobre la base de los ya existentes. Y esa es la imagen que ofrece, por ejemplo, Karl Popper en *La lógica de la investigación científica*, según la cual un científico, teórico e investigador, produce aserciones o sistemas de aserciones, y los controla paso a paso. [2] A esta imagen algo optimista e idealizada de la investigación científica, Kuhn responde señalando la necesidad de una ruptura que ataque precisamente ese método que, según Popper, permite que el conocimiento resulte científicamente aceptable.

Según Kuhn, existe algo así como una «ciencia normal» en cuyo interior impera cierto paradigma, y en ese período de ciencia normal las cosas funcionan, *grosso modo*, como las describe Popper: el científico, refiriéndose a su propio paradigma de pertenencia,

examina la consistencia y coherencia de los descubrimientos que va realizando. Y mientras las cosas avanzan por este camino, la ciencia progresa en sentido acumulativo. Pero aparece un hecho, ocurre algo en el mundo, que ya no se ajusta al paradigma dominante. Entonces, la comunidad de científicos elabora formas cada vez más complejas y barrocas para razonar estas nuevas evidencias. En pocas palabras, intenta «salvar los fenómenos» que se le presentan. Pero cuando tales estrategias de supervivencia del paradigma dominante resultan demasiado complicadas, entonces la ciencia normal entra en una verdadera crisis. Este es el terreno sobre el cual surge y cobra vida una revolución científica, que destruye la ciencia normal, derriba sus paradigmas e impone su supremacía:

> El surgimiento de teorías nuevas se ve usualmente precedido por un período de profunda inseguridad profesional. […] Como sería de esperar, dicha inseguridad está provocada por el persistente fracaso a la hora de resolver como se debería los rompecabezas de la ciencia normal. El fracaso de las reglas existentes es el preludio de la búsqueda de otras reglas. **[3]**

En ese momento, las reglas son sustituidas. Se abre una fase de gran creatividad en la cual la ausencia, o el progresivo declive, del paradigma dominante desencadena las potencialidades imaginativas de la ciencia. En esta fase extraordinariamente productiva, las reglas de una ciencia acumulativa y ordenada, como quería Popper, dejan de ser válidas. Los enunciados de la ciencia empiezan a cobrar un valor y una fuerza inéditos, y los científicos, jugando al juego de la nueva ciencia, inventan también las reglas básicas. Popper se preguntaba, irónicamente: «¿Puede justificarse ningún enunciado por el hecho de que Karl Popper esté absolutamente convencido de su verdad? La única respuesta posible es que no». **[4]** Por el contrario, una revolución científica parece un momento en el que tiene validez, precisamente, el hecho de que la respuesta a esa pregunta sea que sí.

Respecto a la revolución científica del siglo XVII, otro gran epistemólogo del siglo pasado extrae conclusiones fascinantes. En su volumen mordaz y polémicamente titulado *Tratado contra el método. Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*, Paul

K. Feyerabend, que se considera un anarquista de la epistemología, demuestra cómo Galileo Galilei, precursor de la ciencia moderna, utilizaba precisamente esa clase de estratagemas que la ciencia normal prohibía, consistentes en recurrir a las temibles hipótesis *ad hoc*; [5] en consonancia con la estricta descripción popperiana, la hipótesis *ad hoc* sería rigurosamente inadmisible. Pero cuando nos encontramos ante la aparición de un nuevo paradigma descriptivo, en ese campo en el que aún no hay nada garantizado, la demolición de lo antiguo implica también, y sobre todo, la formulación de hipótesis que no están respaldadas por la evidencia de los hechos. Feyerabend añade que un epistemólogo orientado hacia una concepción metodológica y ordenada de la ciencia, si hubiera vivido en el siglo XVII, habría tenido que decantarse por las escuelas académicas aristotélicas, rechazando la nueva ciencia, porque precisamente las escuelas tenían de su parte la razón del método: «los "aristotélicos" se las arreglaban muy bien mientras que los "modernos" estaban enfrentados a numerosos problemas que disimulaban con estratagemas propagandísticas». [6]

Sin embargo, la visión de estos epistemólogos no debe tomarse como si fuera un himno a la falta de reglas y de control. La postura que defienden Kuhn y Feyerabend refleja una imagen de la historia y de la lógica de la ciencia que pretende ser más realista que la transmitida por manuales y rigurosas metodologías. Su compromiso consiste en demostrar cómo, a la luz de los hechos históricos, lo más importante en el progreso científico es la ruptura violenta, el momento de ruptura, gracias a la cual irrumpe en la escena una nueva teoría que, en un instante, aniquila un paradigma sedimentado durante años o incluso milenios.

La época de la que nos ocupamos en estas páginas, y su figura central, Galileo, deben ser considerados, valga el juego de palabras, paradigmáticos de todo nuevo cambio de paradigma. No sólo surge una novedad teórica sin precedentes, sino que además esta se impone con una violencia y una claridad sin precedentes. La revolución científica del siglo xvii puede ser considerada, de alguna manera, como el modelo del que surge por primera vez esa estructura esencial que guía el momento de ruptura del

conocimiento. En este sentido, Kuhn argumenta lo siguiente:

> Estas transformaciones de los paradigmas de la óptica física constituyen revoluciones científicas y las sucesivas transiciones de un paradigma a otro mediante una revolución constituyen el patrón usual de desarrollo de la ciencia madura. Sin embargo, no es el patrón característico del período anterior a la obra de Newton. [7]

El camino que lleva del aristotelismo medieval a la física de Newton, pasando por las teorías de Copérnico, Kepler, Brahe, Bruno y Galileo, revela el esquema a través del cual es posible leer la estructura de las revoluciones científicas. Es innegable la importancia de los descubrimientos de Lavoisier al desacreditar la teoría del flogisto, o el descubrimiento de Maxwell de las leyes del electromagnetismo. Sencillamente, se produjo una magnífica conjunción en la transición del siglo XVI al XVII, asociada al espíritu barroco, melancólico y saturnino, como decía Walter Benjamin, [8] de las instituciones eclesiásticas, que ha sabido instaurar el propio paradigma de todo cambio de época.

La historia que explicaremos es, en realidad, una historia de errores. A menudo, quien ha querido demostrar algo ha acabado por demostrar otra cosa totalmente distinta. Por ejemplo, Tycho Brahe, aun siendo aristotélico y de fe geocéntrica, acabó ofreciendo un material irremplazable para sustentar la hipótesis heliocéntrica. Veremos también a Kepler, que, queriendo comprobar una teoría errónea sobre los torbellinos generados por el Sol, acabó formulando leyes físicas aún vigentes en la actualidad.

Además de una historia de errores, será también una historia de paradigmas. La ruptura del aristotelismo se debe, en gran parte, a la influencia de dos teorías antiguas que, mientras tanto, los sabios bizantinos introdujeron lentamente en Occidente: la teoría hermética y el platonismo, que actúan de una forma sorprendente frente a la inactiva tradición atomista. El celeste, ideal y divino Platón, gracias a la matematización de los términos que había teorizado, acabó alejándose del atomista Demócrito, y consiguió componer un paradigma científico sólido y compacto, a expensas del materialista Aristóteles, sobre cuya concreción de pensamiento

se expresó bien Rafael en la escuela de Atenas. De todos modos, conviene esperar y presentar inicialmente estos modelos antiguos, que consiguen explicar por sí solos la disputa que en el siglo XVII dio lugar a uno de los episodios más importantes de la historia: la revolución científica.

En el manuscrito *La ideología alemana*, Marx describe la revolución política comunista no como un ideal al que la realidad deberá conformarse; por el contrario, la revolución social es «el movimiento real que anula y supera al estado de cosas actual». En las siguientes páginas se describirán los presupuestos y el desarrollo de un movimiento real similar que, en la práctica, al menos en el ámbito cognoscitivo de las ciencias concretas, ha anulado y superado el actual estado de cosas. **[9]**

Filosofía y física. El peso de la tradición

Hoy en día damos por sentada la diferencia entre filosofía y física o, más en general, entre el saber filosófico (y, por tanto, humanista) y el saber científico (y, por tanto, naturalista). Pero a los comienzos del pensamiento moderno, esta distribución no estaba tan clara. Los grandes físicos eran grandes filósofos, y los grandes filósofos, a su vez, no podían abstenerse de ocuparse de forma minuciosa y detallada de los problemas planteados por la física. La filosofía tenía una pretensión fundamentalmente sistemática y global, y se consideraba la rama del saber capaz de ofrecer una unificación de los conocimientos en general. Si en la Edad Media fue degradada y relegada al poco gratificante rol de *ancilla theologiae* (sirvienta de la teología), la Edad Moderna empezó a concebir la filosofía como saber de los saberes, es decir, como una especie de saber generalista capaz de asumir la tarea de incorporar las distintas disciplinas en un corpus unitario.

Según una interpretación manualística, la revolución científica se considera una intromisión, dentro de la filosofía, de elementos culturales procedentes del exterior de su ámbito tradicional. En concreto, la revolución científica estaría causada por una novedad interpretativa bastante radical.

Sin deslegitimar este tipo de interpretaciones, hay que remarcar que, siguiendo este camino, se corre el riesgo de simplificar en exceso. En efecto, la filosofía moderna vive y se desarrolla en el seno de la tradición, pero de una tradición que no es nada unitaria y que deriva, en gran parte, de la interpretación de los textos antiguos. Por lo tanto, cuando se habla de la revolución científica hay que afrontar una fusión, y un enfrentamiento, entre elementos internos de la propia tradición moderna, que da lugar a la aparición de un nuevo paradigma pero que parte de paradigmas ya

sedimentados.

Si damos un salto temporal, podemos decir que en el siglo XVI estaban activas principalmente tres tradiciones filosóficas: la tradición aristotélica, la atomista y la platónica. Para comprender la novedad y la génesis de la revolución científica hay que comprender cómo han interactuado estas tres tradiciones para dar lugar a una verdadera alteración del saber que no puede compararse con nada de lo visto hasta entonces.

Los tres modelos citados colisionan inevitablemente. El aristotelismo, por ejemplo, ha sufrido una crisis muy fuerte y su declive resulta evidente por lo importante que fue, en el pasado, el carácter, por así decirlo, totalitario de su interpretación del mundo; el aristotelismo, a través de la teología cristiana de Tomás, supo garantizar una clase de orden que, cuando entró en crisis, nadie más fue capaz de ofrecer. Pero la revolución científica puede considerarse tanto un enfrentamiento entre modelos interpretativos del mundo, como el epifenómeno de una crisis social y política, como han sugerido estudiosos del calibre de Ludovico Geymonat. **[10]**

Cuando se trata este delicado episodio histórico, hay que estar totalmente atentos y exponer todas las alternativas que ha generado la historia de los estudiosos. Por lo tanto, lo primero que se va a hacer en este libro es presentar los modelos de los que ha partido la revolución científica en su conjunto. En concreto, la alusión hace referencia a la concepción de la física y del sistema planetario.

El modelo aristotélico

Según el modelo aristotélico, en el centro del sistema planetario, como ya es sabido, se sitúa la Tierra, la cual no se concibe como un planeta —la revolución científica se produce en el momento en el que la Tierra empieza a considerarse un planeta como los demás—. Según este modelo, el universo es un conjunto espacial finito. Más allá del universo, lo que podemos encontrar es, sencillamente, la nada, que no debe confundirse con el vacío de la física moderna. El vacío es una porción de espacio y, por lo tanto, siempre sigue siendo un algo. Por el contrario, la nada es precisamente la ausencia de todas las cosas, incluido el espacio. Por otra parte, según la teoría que se le atribuye a Aristóteles, el universo tiene una forma esférica, puesto que, de entre todos los sólidos de la geometría, la esfera es claramente la que mayor grado de perfección tiene.[11] Por ese motivo, puede entenderse el modelo aristotélico como un modelo de tipo cualitativo, ya que se basa en la idea de la perfección formal y no en lo cuantitativo del tamaño.

La forma esférica del universo está diseñada como una suma de esferas concéntricas, cuyo movimiento, también concéntrico, posee, como puede comprenderse, velocidades periféricas distintas, que crecen a medida que nos alejamos del centro. Los planetas están diseñados como incrustaciones en el interior de las esferas y son estas las que realmente se mueven. Un astrónomo de la Antigüedad como Eudoxo de Cnido había intentado resolver los problemas del modelo aristotélico complicando considerablemente su estructura. Por ese camino se llega a una idea del universo como de una estructura que contiene cuatro esferas por cada planeta, con las relativas bolas intermedias que evitan la fricción de una contra la otra durante el movimiento. Por tanto, un total de 55 esferas cuyo objetivo es explicar la complejidad del movimiento planetario. De esta manera se resuelven algunos problemas, pero aparecen otros. Por ejemplo, las esferas intermedias obligan a valorar la existencia del vacío, que Aristóteles consideraba inadmisible.

El movimiento claramente imperfecto de los planetas se justifica basándose en la metafísica aristotélica, concretamente en la distinción entre potencia y acto. El motor inmóvil es potencialmente perfecto, pero no por eso puede decirse que el acto del movimiento también lo sea. El problema radica en justificar la transición entre acto puro inmóvil y el movimiento en sí. El movimiento de rotación de las esferas celestes, que está cercano a la perfección, se plantea como término medio entre el acto puro, que mueve las esferas sin ser movido, y el movimiento en general. De esta manera se establece una jerarquía en la física: motor inmóvil, movimiento de rotación, movimiento que se produce en la física sublunar, es decir, por debajo de la última esfera. Así se determina la distinción entre una física perfecta (la celeste) y una física imperfecta y corruptible (la terrestre).

El movimiento, según Aristóteles, es capaz de determinar las sustancias a las que se aplica, generando así la división de las disciplinas, con la metafísica idónea para ocuparse solamente de la sustancia eterna exenta de movimiento. El carácter de término medio que posee el movimiento de rotación, el cual, gracias a su homogeneidad es al mismo tiempo eterno y en movimiento, es lo que permite a Aristóteles comprender el movimiento como exento de causa en su origen. En efecto, el movimiento es eterno, y por tanto no puede nacer, igual que ocurre con el tiempo. El movimiento principalmente regular y, en este sentido, perfecto es el de la esfera externa, que corresponde al cielo de las estrellas fijas. Las esferas más internas, en cambio, no hacen otra cosa que repetir de una forma menos pura y perfecta ese movimiento, como se ve, por ejemplo, en el movimiento de declinación del Sol, que lo distingue de la uniformidad del movimiento de las estrellas fijas. Entre el movimiento que se produce en el mundo supralunar y el que tiene lugar en el mundo sublunar existe una clara antítesis que corresponde a una contraposición de tipo tanto religioso como cualitativo, y que encuentra una réplica también en el judaísmo, donde la Tierra —lo que está debajo de la Luna— se considera impura, a diferencia de la perfección del cielo. La física moderna se caracterizará precisamente por la revisión y el rechazo de esta concepción cualitativa del concepto de espacio.

La idea de un espacio cualitativo se une a otra idea típicamente aristotélica: la imagen de la materia como un *continuum*. La materia, en este sentido, no está compuesta por elementos últimos indivisibles, sino que es un elemento basado en la continuidad, como se dice también en las *Categorías*.[12] En consecuencia, el espacio se define como continuo, y esta definición implica la concepción según la cual el espacio es en sí mismo cuantificable, pero no numerable de forma finita. También sobre este punto la física moderna deberá insistir con especial atención. La interpretación aristotélica del espacio y del lugar, esto es, del espacio ocupado por el cuerpo, puede encontrarse en el cuarto libro de la *Física*, en el que aparece una definición del espacio que excluye la posibilidad del vacío.[13] El lugar, en sentido físico, puede albergar materias diversas, eso sí, siempre debe contener alguna. No existe lugar exento de materia, por tanto, el lugar coincide con la extensión de una materia concreta.

El vacío, según Aristóteles, es un concepto totalmente contradictorio, ya que se describe como *locus sine corpore locato* (lugar sin un cuerpo localizado en él). Pero desde el momento en que el lugar se define como aquello que contiene un cuerpo, como el límite del cuerpo, el vacío constituye una contradicción: no existe ninguna entidad corpórea que no sea de naturaleza material. De ahí se desprende el motivo por el que hemos presentado la física en estrecha conexión con la filosofía. La filosofía es, hasta la modernidad, la vía argumentativa a través de la cual se intenta razonar la argumentación física, recurriendo tanto a la lógica del discurso como a la metafísica. Por otra parte, y a diferencia de Demócrito, para Aristóteles la inexistencia del vacío se demuestra también porque, si se admitiera su presencia, sería imposible definir y demostrar el movimiento. En efecto, si admitiéramos el vacío, tendríamos problemas para describir el movimiento en los términos de las coordenadas alto, bajo, derecha, izquierda, que en el vacío perderían sentido. Por eso, el espacio coincide con la materia, y ambos poseen una base cualitativa, no simplemente cuantitativa.

El éter es la materia de la que está compuesto el mundo celeste y su cualidad es la de ser incorruptible; por el contrario, el mundo

sublunar está compuesto por una materia cuya cualidad es la de ser perecedera y corruptible. Los cuatro elementos de la física antigua que Aristóteles recupera de Empédocles pueden inferirse de sus cualidades, que están diseñadas según pares opuestos: calor/frío, seco/húmedo, pesado/ligero, áspero/liso, duro/blando, resistente/frágil; los dos primeros pares hacen referencia a las cualidades fundamentales de los elementos, que se definen de la siguiente manera: «fuego: caliente y seco; aire: caliente y húmedo; agua: fría y húmeda; tierra: fría y seca». [14] Por ese motivo los elementos no son inmutables y, teniendo en cuenta sus cualidades, pueden ser transformados. Esta idea sirvió como fundamento para la alquimia en la Edad Media.

El movimiento circular, que como ya se ha visto es cualitativamente superior a cualquier otro tipo de movimiento por su eterna igualdad, puede ser realizado exclusivamente por el éter, entendido como materia superior. Por el contrario, en el mundo terrenal domina el movimiento rectilíneo que se realiza en los cuatro elementos perecederos. De hecho, en el movimiento de rotación el cuerpo se mueve, pero al mismo tiempo no se desplaza, por lo que nunca falta nada en su lugar; como es obvio, el movimiento rectilíneo no posee estas características. Pero el movimiento terrestre es, a su vez, de tipo cualitativo, puesto que nace a partir del movimiento celeste de la rotación, que sólo puede establecer las coordenadas del movimiento rectilíneo. El punto de referencia del movimiento es el centro de la Tierra, que coincide a su vez con el centro del cosmos entero. De esta manera, el movimiento de rotación nunca varía su propia posición respecto al centro del cosmos.

En consecuencia, el movimiento siempre debe tener una causa, esto es, debe haber un motor que haga mover el cuerpo, y no es posible que ello ocurra sin contacto, una prueba más a favor de la inexistencia del vacío. El movimiento de los seres inanimados, los cuales, a diferencia de aquellos que están dotados de alma, no tienen motor en su interior, puede ser de dos tipos. El primero se define como «natural» y corresponde a la tendencia de los cuerpos a su propio lugar natural. Así, lo que es terrenal tiende hacia el centro de la Tierra, mediante su *gravitas*, mientras que lo que es aéreo

tiende hacia lo alto, en virtud de su *laevitas*.[15] Para que el cuerpo se mueva, en este caso, debe haber un motor, que es la forma sustancial, es decir, el elemento cualitativo del cuerpo. Eso significa que el movimiento del cuerpo, en esta dinámica, no se ve afectado por la aplicación de una fuerza en el cuerpo, sino, por el contrario, por una tendencia sustancial, y la física moderna de la gravedad ha tenido lugar, precisamente, como revisión de este punto.

El otro movimiento que se distingue del natural es un movimiento que infringe sus leyes y tiende al desorden, allí donde lo natural tiende al orden; se trata del «movimiento de manera forzada» o «contra naturaleza».[16] El ejemplo más inmediato es aquel en el que la mano arroja una piedra hacia arriba, de modo que interfiere con la tendencia de la piedra a establecerse en su propio lugar natural, que es justamente debajo. Otro ejemplo puede ser el del remolque, donde el cuerpo se desplaza a través de una intromisión violenta en su estancamiento.

Si se observa la forma en que Aristóteles describe el movimiento, se percibe cierta similitud con algunas ideas de la física moderna, pero se trata de una similitud sólo aparente. Aquí domina una interpretación fundamentalmente cualitativa de todo lo que respecta al movimiento y al desplazamiento de los cuerpos por su constitución material, allí donde la física moderna ha dado vuelta, con cierto éxito, hacia una noción totalmente cuantitativa. La física moderna parte de un concepto general del movimiento, del cual la fuerza de la gravedad es un caso especial. La caída de los cuerpos, en el modelo aristotélico, no se relaciona como el caso concreto de una ley general, sino de una forma totalmente específica y cualitativa. Toda esta clase de problemas impedían, por ejemplo, pensar en algo como la inercia, que Galileo definió por primera vez, considerándola una persistencia del movimiento más allá de la presencia de un motor. Pero, nuevamente, esto tiene sentido sólo con la condición de poder pensar en el vacío, que según Aristóteles quedaba totalmente excluido de la física y la metafísica. La naturaleza cualitativa de la física aristotélica se reitera también en *Metafísica* XII, donde se reproduce una crítica a la metafísica y a la física de Demócrito,[17] donde el movimiento es descrito en

relación con la conexión de acto y potencia. Para alcanzar una física moderna, el elemento cualitativo deberá ceder el paso a la concepción cuantitativa.

El modelo atomista

El atomismo se presenta como el primer rival del modelo aristotélico y, junto con el platonismo, contribuye a la crisis y la caída definitiva de la física de Aristóteles. Es interesante ver que, a pesar de esta colaboración entre el modelo atomista y la física de inspiración platónica en la derrota del aristotelismo, tanto Aristóteles como Platón habían polemizado duramente en primera persona con el atomismo de Demócrito y Leucipo.

El atomismo, que puede denominarse también corpuscularismo, nace de la necesidad de la física eleática de mantener unidas la presencia del ser (por lo tanto, de la materia) y la existencia del movimiento. Los primeros modelos de este tipo aparecen, además de en Leucipo, en Empédocles. Según este último, los corpúsculos que forman los cuatro elementos corresponden a sus «raíces permanentes», que pueden unirse o separarse entre sí.[18] Pero es Leucipo quien abandona la concepción cualitativa del atomismo, todavía presente en Empédocles, y quien propone un modelo totalmente cuantitativo, haciendo del atomismo la bandera de un pensamiento antimetafísico, una connotación que permanece sólida hasta la era moderna y el período de la Ilustración. De hecho, el atomismo suele ir de la mano del materialismo y de la consiguiente acusación de ateísmo, que ya formula Aristóteles contra Leucipo. Si se observa a Demócrito, por ejemplo, los elementos ya están marcados por la dimensión cuantitativa y corresponden al lleno y al vacío. El primero consiste en la existencia, el segundo en la no existencia. De esta forma, no se establece una distinción cualitativa entre el ser y el no ser, se trata simplemente de dos formas de comprender las relaciones entre los cuerpos con carácter absolutamente cuantitativo.

La raíz de la palabra «átomo» significa ‘aquello que no tiene partes’, ‘aquello que no puede ser cortado’ o roto. La crítica aristotélica del atomismo, manteniéndose en su enfoque naturalista general, es una crítica de tipo lógico y no físico. Si el átomo es lo

que constituye la materia, pero al mismo tiempo no tiene dimensiones, significa que la materia se compone de un conjunto de elementos nulos, lo cual constituye un contrasentido. Más allá de la simplificación aristotélica, la doctrina atomista demuestra que la situación, en realidad, era algo más compleja. El átomo es eterno, inalterable, dotado de un número infinito de formas y puede moverse en todas las direcciones en el interior de la infinidad del vacío. En este enfoque, las diferencias cualitativas son el resultado de modificaciones, en su base, de naturaleza cuantitativa: figura, orden y posición. Siguiendo con esta interpretación, las cualidades sensibles de los cuerpos corresponden a puros y simples nombres; y a eso se referirá después Galileo en *El ensayador*. Lo único que existe, según la interpretación atomista, son los átomos y el vacío. Las cualidades equivalen a las convenciones entre seres humanos, y por eso esta concepción se halla en total oposición a lo que argumentaba Aristóteles: no existe nada esencial en el aspecto cualitativo de los cuerpos y de las propias sensaciones.

En cambio, Epicuro tiene una visión del atomismo mucho menos radical, que no se limita a teorizar un tipo de metafísica invertida de la materia para oponerse a la metafísica platónica y aristotélica. En la *Epístola a Heródoto* habla, sobre esta cuestión, del hecho de que los átomos no tienen dimensión cualitativa, sino que disponen solamente de cambios cuantitativos.[19] Lo que corrige y perfecciona el enfoque anterior es el radical convencionalismo en la definición de las cualidades.

En este contexto, es preciso dar una explicación que sepa justificar el ser y el no ser, puesto que el espacio existe en su pureza exclusivamente como una forma de ausencia de materia. Los atomistas admiten necesariamente el espacio vacío y lo hacen para justificar el movimiento; pero las motivaciones que emplean son iguales y opuestas a las que Aristóteles utilizaba para negar el vacío. Lo que está en juego en estas variaciones son las preocupaciones de orden metafísico que tienen una influencia y una función en el círculo más amplio de la física, contribuyendo al desarrollo científico. En este sentido, es de gran relevancia el impacto de *De la naturaleza de las cosas* de Lucrecio, que en el primer libro incluye

las razones por las que se debería admitir la existencia del vacío. [20] Para empezar, si no se admitiera el vacío, las cosas no podrían moverse, porque la materia debería penetrar otra materia; por tanto, no habría nada capaz de iniciar el movimiento. Pero el movimiento es algo que nosotros vemos y reconocemos y constituye un componente esencial de la vida; por lo tanto, es necesario admitir el vacío. El propio crecimiento de las cosas naturales puede ser explicado solamente por medio del llenado, y el llenado exige pensar en el vacío. La materia empieza a ser considerada como porosa, es decir, como si contuviera en su propio interior el vacío, precisamente en forma de poros. Siguiendo con la metáfora del crecimiento, la comida, cuando es asimilada, se expande por las diferentes partes del cuerpo y da lugar al aumento cuantitativo de aquello en lo que se inserta.

Otro aspecto que puede explicarse a partir de esta teoría es la diferencia de peso en el contexto de igualdad de volumen. Era necesaria una metafísica de la materia para justificar el hecho de que un metro cúbico de hierro pesa mucho más que un metro cúbico de agua, y eso era posible gracias al recurso de la porosidad de la materia: cuanto más porosa es una materia, más disminuye su peso.

El espacio se percibe como algo ilimitado, ya que no existen elementos que puedan ser externos a él. No existe nada exterior al espacio, ni siquiera sobre la base de que el vacío corresponde también a la espacialidad. Por eso, el todo es válido única y exclusivamente como suma de las partes, como conjunto mecánico de elementos materiales concretos, y ya no debe entenderse como un todo cualitativo, lo cual, como hemos visto, ocurría en el modelo aristotélico. Dentro de la escuela atomista, se produjeron varias disputas, como por ejemplo la del peso de los átomos. Para Demócrito, los átomos no tienen peso, mientras que para Epicuro, sí. La idea de la infinidad del universo, inherente a la doctrina atomista, exige resolver la cuestión de las dimensiones y de la dirección. Si nosotros establecemos una relación entre algo finito y algo infinito, las dimensiones pierden su significado. En este sentido, Epicuro emplea el peso de los átomos y, por lo tanto, su caída para mantener como mínimo las coordenadas alto y bajo en

un universo infinito. Así, la dirección es vista como una coordenada definible en el seno de la reacción entre dos objetos, pero no respecto al universo en su complejidad, que siendo infinito imposibilita la definición posicional de las cosas concretas.

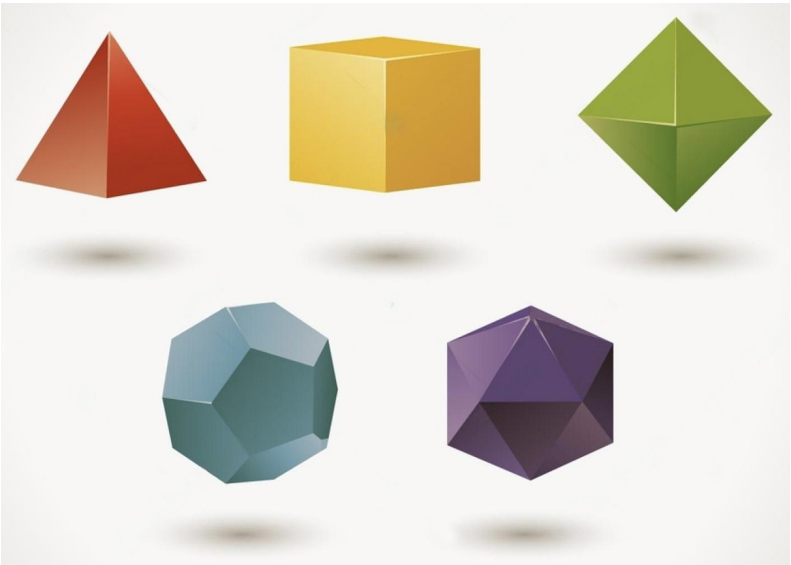
El universo de los atomistas tiene el objetivo de presentarse de una forma rigurosamente mecanicista, esto es, como espacio dentro del cual no existe ninguna dimensión de espontaneidad. Estamos ante un movimiento constante, a pesar de que ello implique hacer frente a la cuestión de los choques, totalmente inexplicables de acuerdo con una doctrina del movimiento rectilíneo y simétrico de los propios átomos. Todos estos elementos de ambivalencia en la composición del movimiento facilitan que se produzca una crítica del atomismo, que ya en época romana expuso Cicerón en *Del hado*. En este contexto, a los atomistas se les reprocha la presencia de un movimiento impulsivo de los átomos en el interior de un universo mecanicista, lo cual puede conducir a problemas y malentendidos.[21] Por eso, Epicuro introduce el peso de los átomos y el concepto de gravedad, pensado en sentido aristotélico. Esta variación surge por el hecho de que el movimiento descrito por atomistas como Demócrito y Leucipo en su origen combinaba la dimensión mítica y la científica, como demuestra la cosmogonía propuesta por el propio Demócrito. Se trata de la preocupación por razonar la idea de un mundo eterno que se origina a partir de la relación entre la dimensión de lo corpóreo y la del vacío y en la que se introduce el concepto de vórtice, generado por la atracción de los fragmentos de materia hacia el vacío. Este modelo excluye la presencia de una inteligencia para conducir el método, lo cual, en cambio, puede deducirse fácilmente del discurso aristotélico sobre el motor inmóvil. Por el contrario, en el atomismo está en juego una fuerza necesaria que genera el movimiento sin ningún recurso, directo o indirecto, en el plano de lo inteligible. El modelo de Demócrito, precisamente por estas razones, atraerá a numerosos seguidores en la Edad Moderna, y su teoría de los vórtices será retomada, por ejemplo, por el mismo Descartes.

Pero en la Edad Antigua, a partir de la concepción atomista no se estableció ninguna ciencia. A diferencia del modelo aristotélico,

en el que se basó el conocimiento científico durante una cantidad ingente de siglos, los atomistas no produjeron teorías válidas. A pesar de la avanzada descripción de su concepción de la materia, los contenidos específicos de las observaciones empíricas son toscos, y superados brillantemente por el modelo aristotélico. Por ejemplo, la idea de los mundos infinitos sonaba ridícula durante el clasicismo griego, mientras que se volvió a proponer con fuerza en el mundo moderno, y de ella se extrajeron conclusiones muy fecundas.

Para entender este aspecto basta con pensar en la concepción atomista de la Tierra, que Lucrecio presenta como un disco con los bordes realzados[22] y que Leucipo concibe con la forma de un tambor. El propio Epicuro reitera estas concepciones, y Lucrecio afirma que el Sol es tan grande como parece. La idea subyacente de estas extravagantes concepciones responde a la necesidad atomista de simplificar y desacralizar el reino de los cielos. Se trata de un pensamiento irreligioso, preocupado más por la propia eficacia provocadora que por la capacidad de respuesta científica a la realidad: la idea fundamental es la de condenar y desmentir el deseo divino como fundamento de una especie de creación del mundo. Estas imágenes de los atomistas, oportunamente revisadas y hechas científicas, tendrán un notable impacto en el mecanicismo de los siglos XVII y XVIII.

El modelo platónico



Los sólidos platónicos: Tetrahedron, Hexahedron, Octahedron, Dodecahedron, Icosahedron.

Como ya se ha dicho, el otro modelo que contribuye a la crisis del aristotelismo es el platónico. Para evitar malentendidos hay que decir que en Platón no puede constatarse un enfoque favorable a la investigación naturalista. La célebre imagen de la escuela de Atenas con Aristóteles empeñado en señalar la Tierra mientras Platón señala las maravillas del cielo ejemplifica esta descripción. Así, en *Fedón* se dice de forma explícita que Sócrates ha abandonado la investigación de la naturaleza para interesarse por lo que es en realidad más digno: el estudio del hombre.[23] Del mismo modo, cuando Fedro se sorprende de que Sócrates, que nunca se ha alejado de la ciudad, no conozca el hermoso árbol que crece en un riachuelo cercano a donde vive, le responde lo siguiente: «No me lo tomes a mal, buen amigo. Me gusta aprender. Y el caso es que los campos y los árboles no quieren enseñarme nada; pero sí, en

cambio, los hombres de la ciudad». [24] Nuevamente, puede citarse la *República*, donde el conocimiento de la naturaleza se describe como *doxa*, opinión. [25]

También Platón, como ya había hecho antes Aristóteles, polemiza contundentemente contra el atomismo y lo hace mediante la concepción mecanicista del mundo. Platón está motivado por hechos de orden religioso y acusa al atomismo de ser una doctrina que conduce inevitablemente al ateísmo. Al infravalorar el conocimiento sensible, claramente central en la investigación naturalista, se ha dicho en varias ocasiones que el platonismo debió de tener un efecto de demora en el desarrollo de las ciencias. Si así fuera, y efectivamente podemos encontrar este tipo de motivaciones en Platón, hay que reconocer que en el Corpus platónico está presente una concepción de la naturaleza basada en una estructura geométrica, lo cual tendrá una cierta relevancia, por ejemplo, para Galileo. El cosmos de Platón, como es bien sabido, se diferencia del aristotélico por el hecho de haber sido creado y, precisamente, ordenado a partir de una situación inicial de caos. La figura de referencia aquí es el demiurgo, es decir, el genio benévolo que en el momento de crear el mundo se fija en una estructura inteligible. Es decir, el creador se sitúa como intermediario entre el mundo de las ideas y la realización concreta del mundo terrenal, entre el ser y el mundo corruptible y pasajero.

En este contexto, el espacio le sirve al demiurgo como término medio, como «tercera clase» entre el mundo sensible y el inteligible. Por una parte, como el mundo ideal, el espacio está ausente de corrupción y transformación. Por la otra, es lo que alberga las cosas creadas y, por lo tanto, las cosas corruptibles del mundo de los sentidos: supone una condición para la existencia del mundo sensible, aun habiendo una naturaleza suprasensible. El espacio, a diferencia de lo que creía Aristóteles, constituye un contenedor que existía ya antes de la creación. Por eso, no se corresponde exactamente con la materia, pero sí es el que garantiza que la propia materia pueda existir. Además, la concepción platónica posee un marcado ingrediente finalista, de modo que todo aquello que adopta de la tradición, incluso en los aspectos que podrían ser

interpretados en analogía al atomismo, lo interpreta siempre hacia el estudio de un fin. Este aspecto favorece su dimensión religiosa.

Por ejemplo, habla de cuatro elementos, como ocurría en la doctrina de Empédocles, y dicho número responde a razones de tipo matemático-geométrico. En este caso, aunque pueda sorprender, el fundamento es cuantitativo y no, como en Aristóteles, cualitativo. La cualidad para Platón se refiere al mundo de las ideas y no al mundo sensible, por lo que este es degradado a la simple cantidad. Los elementos básicos son el fuego, que garantiza la visibilidad, y la tierra, que garantiza la materialidad. Los otros dos desempeñan un papel de mediación. Como en su doctrina general de la naturaleza, también los elementos se basan en sus formas geométricas: el fuego está representado por el tetraedro, la tierra por el cubo, el aire por el octaedro y, finalmente, el agua por el icosaedro. A estos hay que añadir un quinto elemento, cuya forma de referencia es el dodecaedro, formado por doce pentágonos.

Las formas de los cuatro elementos corresponden a sus características físicas. El fuego es más penetrante y ligero, la tierra es más difícil de mover, ya que el cubo es el sólido más difícil de girar. En la base de cada uno de los sólidos se encuentra la misma figura geométrica: el triángulo equilátero. La divisibilidad de los sólidos, tal y como él la ve, se produce por composición geométrica y da lugar a algo semejante a la teoría corpuscular, a pesar de que, obviamente, Platón nunca habla de átomos. En este sentido, también el problema del movimiento es abordado desde un punto de vista estrictamente religioso. Platón no quiere admitir la casualidad del movimiento, pero se ve obligado a ello por la necesidad de proporcionar al cosmos un principio que puede denominarse auto-cinético. El cosmos, por lo tanto, se entiende como animado, ya que el alma es el propio principio del movimiento. Por ese motivo, empieza a considerar el cosmos como un ser vivo, pero totalmente inmune a la vejez y la enfermedad, que se nutre por sí solo y que no necesita nada más para vivir. [26] Como ocurría con Aristóteles, también para Platón el cosmos posee la forma de una esfera. Ello se debe a que la esfera puede abarcar en sí misma todas las otras figuras posibles y, sobre todo, a que cada punto de su superficie es totalmente equidistante del centro.

La esfera es la forma de la inteligencia y del pensamiento, y parece que además permite la rotación terrestre sobre el eje.[27] Al igual que el cosmos, también los astros son vistos como animales colocados en sus respectivas órbitas por el demiurgo, que les enseña a girar de una forma determinada. Y eso explicaría la diferencia en las velocidades de rotación. Si quisiéramos definir en pocas palabras la concepción de Platón, podríamos hablar de una concepción corpuscular, vinculada a un orden geométrico y que se mantiene unida por un sistema de tipo finalista y organicista. En él se asiste al intento de transferir el aspecto cualitativo, que es el propio de las ideas, a la dimensión de lo cuantitativo, que es lo que opera por detrás de los sentimientos. Aun siendo cuantitativo, se trata de un mundo ordenado, en cuyo interior aparecen elementos extrafísicos y de derivación metafísica, mitológica y religiosa: por encima de todos, el demiurgo, la idea de la creación, pero también el sistema que considera el cosmos como un animal.

Así, el modelo platónico adopta cierta postura crítica respecto al aristotelismo. El aristotelismo, en un determinado momento de su propia historia triunfadora, sufre el ataque de concepciones filosóficas de la física que hasta entonces se han desarrollado paralelamente a él. Atomismo y platonismo empiezan a presentar atractivos, visto el fracaso del paradigma aristotélico.

La astronomía tradicional

La astronomía tradicional, que surge de los cruces y enfrentamientos de estos modelos, presenta un desarrollo incierto, puesto que está mezclada con cuestiones no científicas. Platón fue el primero en atribuir a los astros un movimiento circular uniforme. **[28]** Excepto la Luna, el resto de los astros se consideraban enormes masas de fuego, tanto por su ligereza como por su luminosidad.

Un caso interesante de la astronomía antigua es el de Aristarco de Samos, contemporáneo de Arquímedes. El único testimonio disponible de la época, precisamente gracias a Arquímedes, le atribuye una teoría heliocéntrica del cosmos.

Según Aristarco, el universo tendría dimensiones claramente mayores de lo que había creído la tradición, a pesar de concebirlo como finito, acorde con la concepción positiva de la finitud característica de la cultura griega. Según esta perspectiva, tanto el Sol como las estrellas fijas permanecerían inmóviles respecto al resto. Este enfoque es retomado por Copérnico en la Edad Moderna. Además de Arquímedes, también Plutarco habla de ello tres siglos después en el tratado *Sobre la cara visible de la luna*, donde afirma que, respecto a la cultura griega, la postura de Aristarco era considerada profana, ya que quería mover el corazón del universo. **[29]**

El problema que veía Aristarco tenía rasgos en común con las cuestiones que formularía la modernidad, y que podrían resumirse con la siguiente expresión: «salvar los fenómenos». Existen algunos hechos que entran en conflicto con las posturas de la religión y del mito y, en este caso, plantear la rotación terrestre alrededor del Sol era una forma de justificar los fenómenos observados. También el fracaso de Aristarco en el intento de imponerse a la cultura clásica se atribuye a disputas de naturaleza extracientífica, que no respondían a la dimensión observacional, sino a la religiosa y mitológica.

Con el paso al primer milenio después de Cristo, los conocimientos sobre los planetas empezaron a ser más precisos y surgieron los problemas, que no serían abordados plenamente hasta la era moderna. Se constató que los planetas no presentaban una evolución regular, se registraron variaciones sensibles en la luminosidad (especialmente en Marte y Venus) y, sobre todo, se observó el movimiento retrógrado de algunos planetas en la bóveda celeste. Entre estos fenómenos extraños, la variación de la dimensión lunar fue quizá el más macroscópico.

El primer intento real de elaborar una teoría científica del cosmos lo realiza Ptolomeo de Alejandría en el siglo II, quien, sobre una base teórica fundamentada en el aristotelismo —concretamente, el sistema aristotélico-ptolemaico—, intenta justificar la dimensión observacional mediante cálculos matemáticos. En primer lugar, plantea el epiciclo de los planetas. La Tierra, de acuerdo con esta explicación, es inmóvil, pero los planetas que giran a su alrededor forman, a su vez, epiciclos (bucles), que explican las irregularidades de su movimiento; además, propone la hipótesis de que la órbita del planeta alrededor de la Tierra tiene, en realidad, un centro que no está ocupado por la Tierra, sino que se encontraría en un punto distinto en el eje de la circunferencia. En *Almagesto* presenta estos dos modelos, y su éxito se debe a la capacidad de salvar los fenómenos que empieza a imponerse en la astronomía.[30] Junto con la hipótesis matemática, Ptolomeo elabora también una explicación física y, en su obra posterior *Las hipótesis de los planetas*, intenta vincular el discurso aristotélico sobre las esferas etéreas a la observación empírica de la rotación excéntrica.

Además de estas dos teorías, Ptolomeo elabora una tercera, considerada sin duda la más heterodoxa, por no decir herética, respecto al dogma del aristotelismo, y que ejercerá una influencia directa en Copérnico. Algunos planetas, como por ejemplo Mercurio, son considerados «maliciosos» debido a la naturaleza aparentemente no uniforme de su movimiento. Ante eso, Ptolomeo propone presuponer un cierto grado de irregularidad en el sistema planetario y lo hace mediante la hipótesis del ecuante, que se basa

en un cálculo de cierta complejidad en la relación entre el centro del epiciclo del planeta y la posición de la Tierra.

En lo sucesivo, se creó una división entre los seguidores de la hipótesis física y los seguidores de la hipótesis matemática. Por ejemplo, Ptolomeo negaba el heliocentrismo por razones puramente físicas, puesto que basaba su estudio en la física aristotélica de los cuatro elementos y del movimiento natural. A pesar de ello, admitía que la hipótesis heliocéntrica podría justificar algunos fenómenos observacionales. Por otro lado, quedaba por explicar el hecho de que, si miramos el mundo físico a nuestro alrededor, la hipótesis resultaba totalmente ridícula y no intuitiva. Si la Tierra rotara, sería un movimiento violento, ya que contravendría la naturaleza del elemento que la compone e incluso puede decirse que sería el más violento de todos los movimientos que se producen en su interior. Si nos basamos en la visión común e ingenua del cosmos y en concreto del sistema de la Tierra, sería difícil imaginar un movimiento suyo y conciliarlo, sobre todo, con la teoría de las esferas celestes. Imperaba la idea de los astros considerados como incrustados en las esferas y en el éter, lo cual hacía difícil concebir un movimiento terrestre independiente. De la astronomía tradicional surgió una gran necesidad de mantener unida la tradición religiosa y mítica a las observaciones de la bóveda celeste. Por consiguiente, esa unión de física y filosofía que hemos visto al principio parece obstaculizar de alguna manera el desarrollo científico. Pero habría que esperar muchos siglos para que se produjera un cambio de paradigma, concretamente, el inicio de la concepción moderna de la relación entre ciencia y religión.

La astronomía moderna

La gran fortuna de la que ha gozado el geocentrismo se debe, además de a la concordancia respecto a la concepción religiosa que veía al hombre como centro de la creación, a su capacidad de justificar fenómenos de gran envergadura. Por una parte, gracias a hipótesis matemáticas complejas, puede explicar las irregularidades en el movimiento de los cuerpos celestes. Por la otra, no plantea problemas respecto al mundo fenoménico que rodea a las personas, por lo que casa perfectamente con la física aristotélica. A finales del siglo III, las hipótesis de Aristarco dejan de ser atractivas, a consecuencia también de la crisis del platonismo, que, de una forma u otra, podía ser utilizado para justificar una hipótesis heliocéntrica. El dominio del aristotelismo en la cultura eclesiástica se consolida hasta el punto de crear una escolástica capaz de afianzar sus bases y prosigue hasta la época medieval de las universidades. De esta forma, el geocentrismo se convierte en la teoría aceptada en todos los campos del saber, especialmente en el ámbito teológico.

Dando un salto temporal enorme, ya a finales del siglo XIV, se asiste a un resurgir del platonismo bajo formas claramente distintas respecto al platonismo tradicional. Pero el período clave es el posterior a la destrucción de Constantinopla, en 1453. Con la caída de Constantinopla llegan a la península italiana los sabios bizantinos, que empiezan a enseñar el griego antiguo en una cultura en la que durante siglos ha imperado el latín. Eso permite a Occidente una nueva aproximación a la tradición platónica. En este contexto resulta fundamental la obra de Marsilio Ficino, que traduce al latín la obra completa de Platón, lo que permite que vuelva a difundirse.[31] Ficino traduce también el *Corpus hermeticum*, atribuido a Hermes Trismegisto, lo cual promueve que circulen simultáneamente tanto escritos de Platón como del legado hermético y neoplatónico. En realidad, el *Corpus* no era de ese tal Hermes que habría enseñado a los egipcios la sabiduría divina, pero

sí fue recopilado o incluso escrito en el período helenístico, en el siglo II d. C., como demostró el filólogo francés Isaac Casaubon en el siglo XVII. [32]

El neoplatonismo renacentista y la corriente hermética muestran una fuerte revalorización del elemento solar, y Copérnico, en el momento de ilustrar la teoría heliocéntrica moderna, se remonta precisamente a Hermes Trismegisto. Son numerosos los eruditos que en el siglo XX apoyan la importancia del hermetismo en el proceso de desarrollo de la ciencia moderna, concretamente contra la idea de la Ilustración, que veía una brecha clara con la tradición. [33] Podemos recordar aquí los estudios de Pierre Duhem, que, trabajando especialmente sobre Leonardo, afirmaba que buena parte de las concepciones contenidas en las revoluciones copernicanas ya estaban presentes en la tradición renacentista, que se orientaba hacia un renovado interés por el platonismo. [34] Este es el marco en el que se produce la revolución científica que, más allá de sus innegables novedades, se vincula a una tradición filosófica olvidada para después relacionarse con los nuevos descubrimientos tecnológicos, que poco a poco empiezan a mostrar su influencia en el ámbito puramente científico.

En la cúspide que marca la transición entre una concepción religiosa y una científica del sistema solar podemos encontrar, por ejemplo, a Nicolás de Cusa, que representa las vicisitudes e indecisiones de este período histórico. Si bien la figura de De Cusa no se encuentra entre las más conocidas del proceso de desarrollo de la ciencia moderna, sí merece una cierta atención. Nace en la actual Alemania y desempeña la profesión de embajador desde el momento en que el papa Eugenio IV lo envía a Constantinopla, en 1437. Fruto del conocimiento de la cultura griega clásica, concretamente de Platón, surge *La docta ignorancia*, de 1440. En esa obra desarrolla y teoriza un sistema heliocéntrico que presupone no la observación o el interés científico directo, sino una doctrina puramente metafísica. Su idea es la de una sustancial alteridad del hombre respecto a la divinidad, en la cual se percibe la concepción platónica y neoplatónica de la distancia entre la verdad infinita y la multiplicidad finita. ¿Cómo puede el hombre,

finito, conocer a Dios, es decir, lo infinito? De este tipo de concepciones se deriva esa clase de misticismo positivo que a menudo formará pareja con la reaparición del platonismo.

Dentro del enfoque de De Cusa es característica la imagen de Dios como *coincidentia oppositorum*, es decir, como algo que se sustrae a las limitadas capacidades del ser humano. [35] A partir de esta interpretación, se introducen una serie de variaciones en la cosmología clásica aristotélica.

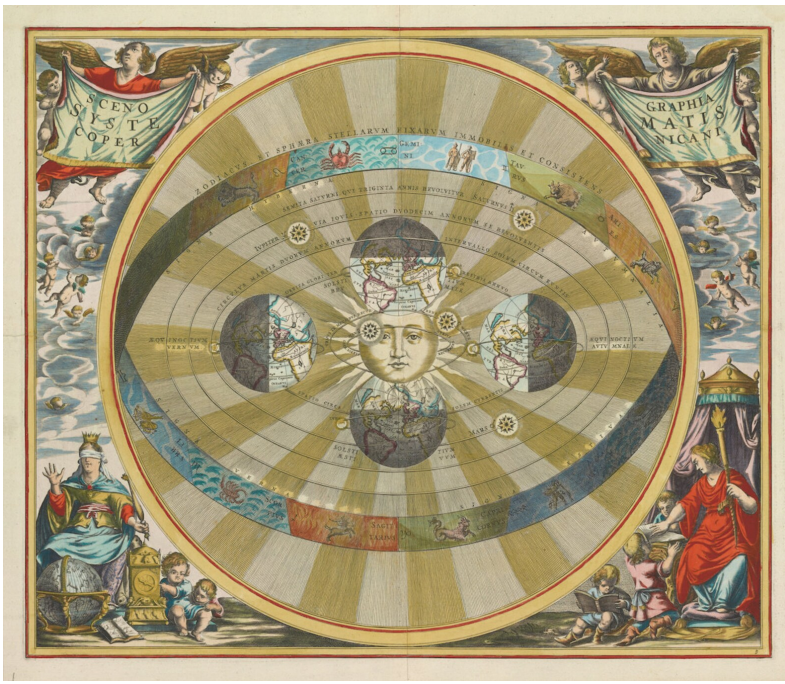
En primer lugar, niega la oposición entre cielo y tierra, y lo hace negando la existencia de una materia incorruptible; en segundo lugar, abandona la imagen del mundo como circunferencia dotada de centro y, en cambio, considera el centro como perteneciente solamente a Dios y, por lo tanto, extendido por cualquier parte del mundo; en tercer lugar, empieza a concebir la Tierra como un astro similar a los demás y, por tanto, dotado de movimiento. Todas estas ideas serán retomadas posteriormente por Giordano Bruno. No menos interesante es la observación relativa al hecho de que la Tierra en realidad no está quieta, sino que simplemente lo parece. Se trata de una quietud relativa al punto de observación, del mismo modo que, para determinar si un barco se mueve, hay que tener un punto de referencia fijo. Así, De Cusa demuestra intuir la relatividad del movimiento desarrollada posteriormente por Galilei. Sin embargo, al no ser un físico, De Cusa no desarrolla sus intuiciones en un corpus científico, sino que se limita a presentarlas de una forma imaginativa.

Partiendo de estas suposiciones, desarrolla una concepción de la física con marcados rasgos mitológicos. A las puertas de la revolución científica propiamente dicha, De Cusa aún no es capaz de imprimir una dirección clara a una serie de intuiciones que, en cambio, habrían podido ser extraordinariamente fecundas. Su figura permite ver la fuerte afinidad existente entre los descubrimientos científicos de aquel siglo y el resurgir del platonismo. Su ruptura de la cosmología aristotélica es, en cualquier caso, de una notable importancia. Por otra parte, se ha otorgado un rol de primera magnitud a la obra de De Cusa, exaltando en ella la modernidad; Alexandre Koyré recuerda, por ejemplo, que no hay que olvidar que

es precisamente gracias a él que empieza a abandonarse el modelo de un universo cerrado y finito, idea que tampoco seguirá, al menos no hasta el final, Copérnico. [36]

Como ya se ha dicho, para que surja una física realmente moderna hay que sortear una serie de complicados escollos: es preciso superar la distinción entre una física celeste (perfecta y eterna) y una física terrestre (imperfecta y sujeta al devenir). En consecuencia, hay que abandonar la convicción del carácter circular de los movimientos celestes. También se hace necesario olvidar la imagen de la Tierra inmóvil, que, entre otras cosas, ha sido confirmada por las Sagradas Escrituras. Hay que dejar de creer en la finitud del universo procedente de la teoría de los lugares naturales. Además, la física debe suprimir la necesidad de encontrar una causa para el estado de quietud, como pretendía la teoría aristotélica del movimiento. En fin, es necesario eliminar el desequilibrio entre la astronomía y las matemáticas, esto es, la separación entre astronomía matemática y astronomía física, con su legado aristotélico-ptolemaico. [37] De Cusa, si bien a través de simples intuiciones, se sitúa exactamente sobre este camino.

Nicolás Copérnico



El sistema copernicano en *Harmonia Macrocosmica*, de Andreas Cellarius.

No puede explicarse debidamente la astronomía moderna sin seguir los pasos de la aportación proporcionada por Nicolás Copérnico. Estamos en el siglo posterior al de De Cusa, pero sin movernos del centro del continente europeo. Esta vez desde Polonia llega un estudio predestinado a ser célebre, el *De revolutionibus orbium coelestium*, fechado en 1543, año de la muerte del astrónomo. Como es bien sabido, el suyo es.

El lenguaje de Copérnico sigue vinculado al de la escolástica aristotélica y, de hecho, habla de esferas. La Luna, como puede verse en la ilustración de la página siguiente, es un satélite de la

Tierra, y los planetas están dispuestos de forma ordenada alrededor del Sol y según el orden correcto, a excepción de los planetas que aún no han sido descubiertos. El sistema está conformado, por lo tanto, de la siguiente manera: Sol, Mercurio, Venus, sistema Tierra-Luna, Marte, Júpiter, Saturno, estrellas fijas, cada uno de los cuales presenta un tiempo concreto de rotación. Según su sistema, el Sol es excéntrico respecto al centro de las esferas, de modo que intenta así desarrollar una suposición que sólo será resuelta gracias a la concepción de las órbitas elípticas de Kepler. Además, su sistema tiene algunas particularidades importantes. Para empezar, puede verse que no existe un solo centro. En efecto, uno es el Sol, el otro es la Tierra, que limita con el sistema que forma con la Luna. Posteriormente, la Tierra pierde definitivamente su posición totalmente central, que ahora se le otorga al Sol, único centro del universo en su conjunto. Su cosmos es considerablemente más amplio que el ideado por la tradición aristotélica, y cada movimiento que aparece en el firmamento deriva del movimiento de la Tierra, que Copérnico describe como triple: rotación alrededor del Sol, revolución sobre el propio eje y declinación, que debe explicar el movimiento de las estrellas fijas. También el movimiento retrógrado de los planetas deriva del movimiento terrestre.

La revolución de la concepción del sistema solar empieza a hallar una conclusión. La Tierra es un planeta análogo a los demás, lo cual supone el abandono de la centralidad del suelo sobre el que se desarrolla la vida humana. La gran innovación del modelo copernicano hace referencia, principalmente, al número de movimientos de la Tierra, que son tres. También De Cusa había elaborado, como se ha dicho, un sistema heliocéntrico, pero sus preocupaciones eran de tipo metafísico y religioso. En cambio, Copérnico, con un enfoque no sólo observacional, intenta explicar cuestiones empíricas y derivadas del estudio de los cuerpos celestes, y los vincula a una metafísica platónica. El punto menos consistente de su sistema es la afirmación relativa a la circularidad de las órbitas, que deriva en gran parte de la tradición platónica a la que seguía atentamente.

En este sentido, es interesante observar cómo las intenciones de partida de Copérnico pueden ser consideradas conservadoras, o

incluso restauradoras. Su intención consiste principalmente en restablecer el dogma del movimiento de rotación uniforme formulado por Platón. Ptolomeo, siguiendo a Aristóteles, quiso salvar tanto la metafísica aristotélica como, junto con esta, los elementos observacionales, los fenómenos. Por lo tanto, concibió un sistema cuya composición era completamente barroca. Los epiciclos de los planetas daban la impresión de romper el celestial orden del cielo. Así, Copérnico intenta una vía alternativa. Su modelo mantiene la perfecta circularidad de las órbitas, pero a costa de una no centralidad de la Tierra, que precisamente desde la óptica platónica puede ser sacrificada. Uno de los mayores logros de la ciencia moderna nace con una intención que, aún sobre la vía de la metafísica y la religión, conduce al saber naturalista.

El punto de partida de *De revolutionibus* es la demostración de la perfecta esfericidad de todos los astros, en consonancia con la idea platónica, retomada también por Aristóteles y, en consecuencia, de la esfericidad del propio cosmos. La forma perfecta de la esfera es la única que puede utilizarse para describir el universo. Y la esfera es la forma a la que tiende en su conjunto la materia, dice Copérnico pensando en las gotas de agua. **[38]** De este modo, sin quererlo, Copérnico está, al mismo tiempo, yendo en dirección de eliminar la diferencia entre física celeste y física terrestre. No es la materia de la una o de la otra la que tiende a la esfericidad, sino que es la materia en su conjunto. De esta forma, Copérnico se dispone a modificar la física aristotélica, pero no consigue o, mejor dicho, no está interesado en deshacerse de su forma. Siguiendo con el lenguaje de la relación entre acto y potencia, a partir de la esfericidad de los cuerpos celestes deduce la circularidad de su movimiento, que se adapta por sí misma a su forma perfecta. Todo movimiento del cosmos de Copérnico, incluidos la revolución sobre el eje y los desplazamientos retrógrados, sigue una trayectoria circular.

También el aproximarse y el alejarse de los planetas respecto a la Tierra debe ser explicado sobre la base de movimientos circulares, desde el momento en que toda la misión está al servicio de una restitución de orden y regularidad a la imagen del cosmos, orden y circularidad que sólo pueden ser garantizados por la

circunferencia perfecta del movimiento. Por eso, la circularidad permite explicar las irregularidades, pero al mismo tiempo garantiza el ritmo global. Las estaciones, la repetición de los fenómenos, son explicables gracias a la composición regular de movimientos regulares. Lo que realmente importa no es la naturaleza excéntrica de la Tierra, que, como ya hemos visto, puede ser tomada en consideración, sino la regularidad del movimiento.

En el cuarto capítulo de su obra maestra, Copérnico se centra en el movimiento terrestre, y confirma la perfecta homogeneidad entre esfera y movimiento circulatorio, características ambas de la Tierra. [39] Un aspecto sobre el que también se centra, y aquí ya nos acercamos a una visión científica, es el de los movimientos diurnos del cielo. Efectivamente, cuando observamos la bóveda celeste durante el día, tenemos la impresión de que es el Sol el que se mueve y no la Tierra. En un intento por salvar los fenómenos y, por lo tanto, por justificar las cosas que se nos aparecen, Copérnico teoriza algo que se asemeja a la relatividad del movimiento. Su idea es considerar el fenómeno no desde el punto de vista físico, sino desde el punto de vista óptico: dados un cuerpo en reposo y uno en movimiento, desde un punto de vista óptico resulta difícil determinar cuál de ellos se está moviendo y cuál está quieto, a no ser que se tengan puntos de referencia. Por eso, el sentido común puede engañarnos fácilmente, podría moverse tanto la cosa que observa, como la que es observada, e incluso podrían moverse ambas. [40] En cierto sentido, según la hipótesis física de Copérnico, es más fácil que se mueva la Tierra que la esfera en la que está fijada; por lo tanto, la revolución de la Tierra sobre el eje salva a la una y a los otros: esa particular mezcla de aristotelismo y platonismo que estaba surgiendo y los fenómenos de la observación cotidiana. Junto con el movimiento de la revolución, el movimiento de traslación de la Tierra consigue ofrecer una explicación de la mayor o menor distancia de los planetas desde el punto de observación, tema que ha comprometido seriamente toda la cosmogonía hasta ese momento, excepto la hipótesis ptolemaica de los epiciclos.

Copérnico quiere responder a Ptolomeo. El sistema heliocéntrico posee la gran ventaja de ser más sencillo que el geocéntrico,

precisamente por el hecho de que desaparece la necesidad de presuponer todos aquellos epiciclos que rompen la armonía celeste. Lo que se anuncia en esta hipótesis es un criterio genuinamente científico, ya que elige la simplicidad de esta explicación frente al carácter artificioso de otra. En su carta dedicatoria al papa Pablo III, Copérnico destaca las virtudes de la propia teoría respecto a las teorías rivales.[41] El modelo explicativo representado por la pareja Eudoxo-Aristóteles no es capaz de salvar los fenómenos, es decir, no consigue demostrar las experiencias cotidianas, pero mantiene la regularidad y la simplicidad; por el contrario, el modelo de Ptolomeo salva el mundo de los fenómenos, pero renuncia a la regularidad. Recurriendo a una metáfora naturalista, se asemeja a un hombre que está compuesto por miembros de longitud asimétrica,[42] lo que da lugar a una explicación completamente discordante del cosmos. En cambio, la teoría de Copérnico es tanto física como matemática; es decir, mantiene unidas la necesidad de regularidad del saber matemático, lo cual se ajusta a la tradición platónica, y la necesidad de una correspondencia con los fenómenos físicos observables, tal y como debe hacer una ciencia moderna.

Pero sería erróneo considerar a Copérnico un científico moderno. En el trasfondo de su idea del cosmos todavía es visible una concepción estético-misticizante de origen platónico, concebida a su vez por la tradición hermética, como muestra el giro en dirección a la centralidad del Sol.

A pesar de querer dar una explicación física del cosmos, la dicotomía entre astronomía matemática y astronomía física no deja de influir. Su idea, expresada explícitamente en la carta a Pablo III, es ofrecer una representación real del universo. Aun así, el teólogo luterano Andreas Osiander, que era el encargado de editar la obra, consideró anteponer a la obra un prefacio en el que se hablase de una forma explícita de hipótesis matemática.[43] En este sentido, puede ser interesante advertir cómo los teólogos luteranos, y en general reformados, condenaban inmediatamente el heliocentrismo, mientras que la Iglesia católica no lo hizo de una forma explícita hasta un siglo después. Hablar de hipótesis matemática, en ese caso, debe considerarse como una especie de refugio frente a ese tipo de

críticas, ya que el teólogo luterano ya puede prever los problemas a los que se enfrentaría una teoría en la que, en sentido físico, se afirma la no centralidad de la vida humana respecto al universo.

Así, gracias a esta intercesión, la división entre matemáticas y física en astronomía, una vez descartada por Copérnico, vuelve a recuperarse con Osiander, que sostiene la naturaleza hipotética y geométrica de las tesis copernicanas: hipotética y geométrica significa no necesariamente verdadera. La postura de Osiander ha tenido una cierta resonancia, especialmente en los copernicanos, por así decirlo radicales, que la consideraron una intromisión injustificada. Concretamente, Giordano Bruno calificó al teólogo luterano de «asno ignorante y presuntuoso». [44] Sin embargo, la interpretación matemática y no física del sistema de Copérnico fue poco afortunada, principalmente debido al desarrollo en las observaciones de la bóveda celeste, asociado al progresivo declive de la distinción entre física celeste y física terrestre, lo cual confirma el carácter moderno de la nueva ciencia astronómica que está emergiendo.

Después de Copérnico. Brahe y Bruno

El paso decisivo en dirección a la ruptura de la física aristotélica celeste, que aún insiste en la perfección de lo que está por encima de la Tierra, se debe a Tycho Brahe, astrónomo danés nacido en 1547, poco después de la publicación de la obra de Copérnico. La cuestión principal de las innovaciones de Brahe son una serie de consideraciones relacionadas con los cometas, iniciadas en 1572 gracias a dos observatorios que hace construir para él Federico II de Dinamarca y Noruega, y culminadas con la más célebre de sus observaciones, en 1577. Según la observación de este cuerpo celeste, el cometa se mueve alrededor del Sol siguiendo una órbita que se cruza con las de los planetas. Este simple fenómeno, documentado por una evidencia empírica, demuestra experimentalmente la inexistencia de las esferas cristalinas que debería haber compuesto, según la tradición aristotélica, la bóveda celeste. Desde ese momento se deja de hablar de orbes, esto es, de esferas que giran sobre sí mismas y sobre las cuales están incrustados los planetas, y se empieza a hablar de verdaderas órbitas. Eso significa que los planetas, junto con los cuerpos celestes menores como pueden ser los cometas, tienen un movimiento regular, pero este movimiento es igualmente libre. No están incrustados en una especie de suelo cristalino que los vincula, sino que se mueven libremente en el espacio alrededor del Sol.

Por esa razón, Tycho Brahe considera que aquellas relacionadas con las esferas son imágenes que conservan simplemente un valor didáctico, pero que no son consistentes. Este hecho, como puede imaginarse, tiene enormes consecuencias. A raíz de ello, Kepler puede demostrar la forma elíptica y no circular de las órbitas. También a partir de ese momento, se intensifica la necesidad de proporcionar explicaciones del cosmos que respondan a una física de tipo cuantitativo y no cualitativo. Es así como empieza a desmoronarse definitivamente el modelo aristotélico y lo hace, desde un principio, bajo el impulso de un renovado interés por el platonismo, que lleva a los astrónomos a investigar en direcciones

hasta entonces inexploradas.

Pero la revolución científica nunca deja de sorprender por sus contradicciones. No se trata en absoluto de un movimiento unitario. Brahe es una prueba más de ello. Si Copérnico ha abandonado el sistema ptolemaico por razones relacionadas con la metafísica platónica, lo cual lleva a un progreso, mientras que a su vez apunta, en un cierto sentido, a una regresión, Brahe destruye la teoría de las esferas celestes, pero lo hace bajo la bandera de un firme aristotelismo. El sistema que elabora es, de nuevo, geocéntrico. Según este sistema, el universo está contenido en la esfera de las estrellas fijas, pero en su centro se encuentra la Tierra, alrededor de la cual gira el Sol, en cuya órbita giran a su vez el resto de los planetas.

Precisamente este sistema ha sido posible por el hecho de que ya no hay ninguna esfera cristalina que mantener firme y los planetas son libres de girar cruzando sus respectivas órbitas.

El problema que permanece abierto también con la disposición sucesiva de Kepler es el de la física terrestre en general, que únicamente consigue resolver Newton. Como hemos visto, Copérnico ha empezado a desmontar la dicotomía entre física celeste y física terrestre, tanto que puede incomodarle la expresión enfática de aquel que ha traído el cielo a la tierra. A pesar de ello, la revolución científica conserva su dimensión discontinua y, por lo tanto, se mantiene algo de la perspectiva explicativa precedente. En efecto, el movimiento de rotación todavía tiene la forma de una *qualitas* según la entendía Aristóteles, pero con la diferencia de que ahora esa cualidad, desde el enfoque metafísico, se reconoce también en la Tierra. Mientras que para Aristóteles el movimiento de rotación de la Tierra podía ser solamente un movimiento violento, a partir del momento en que los elementos se desplazan naturalmente hacia su lugar natural, es cuando Copérnico describe como natural la rotación terrestre misma. A pesar de ello, la idea de un movimiento de forma natural y, por lo tanto, de una noción aún cualitativa del movimiento físico continúa existiendo y siendo central en el análisis físico, según una categoría de pensamiento aún aristotélica.

Desde este punto de vista, la doctrina copernicana sirve para rebatir y derrotar una objeción impulsada por Ptolomeo respecto al movimiento de rotación de la Tierra: si realmente se admite que el movimiento de rotación terrestre es, desde el punto de vista aristotélico, un movimiento violento, entonces la materia en sí debería irse disgregando gradualmente. Si, en cambio, como hace Copérnico, se considera natural este movimiento, puede negarse la validez de la objeción ptolemaica contra la rotación terrestre. Haciendo extensivo este razonamiento a todos los cuerpos, se obtiene una noción conservadora y no destructiva del movimiento, que da así otro paso en dirección a la ciencia moderna, que precisamente tenía que basarse en una nivelación de los planos físicos. Otra objeción que se hace al movimiento de la Tierra está relacionada con las nubes, que según Ptolomeo quedarían atrás por la rotación. Y lo mismo sirve para la caída de los cuerpos. De la misma manera que se admite que tirando un cuerpo desde una torre este se dirige hacia el centro de la Tierra, una vez que imaginamos la rotación terrestre debemos también imaginar que el propio cuerpo dibuja una trayectoria oblicua.

La respuesta de Copérnico a dicha objeción resulta inadecuada. Él realmente postula que no se mueve solamente la Tierra, sino que con ella también «una parte no pequeña de aire». [45] Esta respuesta indica que Copérnico todavía piensa en sentido aristotélico los elementos que están en movimiento; los considera como *qualitas* que poseen un movimiento análogo al terrestre. En esta discusión regresa el problema de la *gravitas* y la *laevitas*, que ya hemos visto emerger en el modelo aristotélico. La resolución tiene que ver con la tierra entendida como elemento, que no cae solamente en sentido vertical, sino que posee una composición de movimiento circular. El movimiento de rotación, por lo tanto, es inherente a cada partícula del elemento en cuestión, incluso de lo que está suspendido, y lo es por razones aristotélicas: la implicación del mismo movimiento en el mismo elemento. La parte que no satisface en estas explicaciones, y que actualmente parece tan evidente, se debe al hecho de que, de este modo, se salvan las apariencias haciendo un uso casi instrumental de las hipótesis aristotélicas. Reaparece el carácter discontinuo de la revolución científica; Ptolomeo, que no

consideraba natural el movimiento de rotación, se vuelve paradójicamente menos aristotélico que Copérnico, cuya explicación resulta inexacta debido a su voluntad de aplicar las *qualitates* aristotélicas para explicar la gravedad de los cuerpos.

Según la opinión de Koyré, con el fin de obtener una imagen coherente de la física moderna hay que modificar buena parte del planteamiento de Copérnico.[46] En concreto, la idea de que los cuerpos participan en el movimiento de rotación de la Tierra mediante sus cualidades de elementos primeros sería sustituida con una explicación físico-mecanicista. Dicho en pocas palabras, hay que llegar a la visión de la relatividad de Galileo, en cuyo modelo explicativo el movimiento común de un sistema no influye en los movimientos individuales que se producen en su interior. En resumen, hay que llegar a formular la idea de la relatividad física y no solamente óptica. Por tanto, lo que debe abandonarse de la física aristotélica es la noción de movimiento ligada al discurso de las cualidades de los elementos, pero Copérnico aún no es capaz de hacerlo. Siguiendo con esta interpretación, la revolución científica se produce en la superación misma de las categorías filosóficas de Aristóteles. Observando a Copérnico, deberíamos darnos cuenta de que la distancia que nos separa de él se debe, básicamente, al sistema metafísico de referencia, en cuyo marco el sistema copernicano empieza apenas a superar el aristotelismo, aunque conserva algunas de sus principales estructuras que, sin embargo, no revisten demasiada importancia.

Koyré también defiende que Giordano Bruno dio un paso sustancial y necesario para redefinir el movimiento en la Edad Moderna.[47] Desde cierto punto de vista, tanto Kepler como Galileo se mueven en el surco trazado por la fractura que precisamente representó Bruno en el sistema aristotélico. La jerarquía eclesiástica sería hasta tal punto consciente de ello como para condenar a la hoguera únicamente a Bruno, precisamente por su postura rupturista. Por el contrario, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli considera la física de Bruno como una incomprensión sustancial del copernicanismo, haciendo referencia al diálogo filosófico de Bruno *La cena de las cenizas*.[48] Por otra

parte, Bruno ofrece una objeción de tipo mecánico a la objeción ptolemaica de las nubes que ya hemos visto en relación con el movimiento terrestre. Bruno habla de un efecto de arrastre, según el cual el aire sería arrastrado por la Tierra y las nubes seguirían el movimiento de esta como si se tratara de aire inmóvil.[49] La intuición de Bruno parece ser exacta, a pesar de que el efecto de arrastre no sea tan fuerte como lo imaginaba. Realmente existe una diferencia de velocidades entre el aire a la altura a la que es producido y la que se encuentra a una cuota altísima. La desigualdad de velocidad de rotación entre el ecuador y polos produce corrientes, pero las nubes, como ha visto Bruno, no quedan atrás debido a un efecto como el que se ha descrito.

También respecto a la caída vertical de los cuerpos, Bruno se expresa en sentido antiaristotélico. Los detractores del movimiento terrestre defienden que un cuerpo que se deja caer, y habiéndose admitido la rotación de la Tierra, no podría realizar una trayectoria perpendicular al suelo, sino que debería describir algo así como un arco. Bruno recuerda que ya está presente una objeción similar en *Acerca del cielo*, de Aristóteles, y responde reafirmando la necesidad de contener la naturaleza del sistema de referencia en cuyo interior tiene lugar el movimiento. Desde el momento en que eso se produce en el sistema Tierra, que según la hipótesis está a su vez en movimiento, es necesario modificar el concepto mismo de rectitud y oblicuidad. En otras palabras, Bruno abandona la distinción entre movimiento violento y movimiento natural, básica en la física aristotélica, y llega, por esta vía, a una comparación que los seguidores del estagirita habían negado con rotundidad: el movimiento de la Tierra es comparable al movimiento de la nave. Se trata, en sentido estricto, de comparar un modo natural con uno violento, y eso es posible solamente a condición de anular toda diferencia cualitativa entre los movimientos, y subrayando, en cambio, su característica cuantitativa.

Como puede observarse fácilmente, el movimiento de la nave no altera de ningún modo el movimiento de los objetos que se encuentran en ella. Es decir, los cuerpos que se encuentran en ella forman parte de un sistema dinámico idéntico al que se tendría si la

nave estuviera completamente inmóvil. Tanto si se trata de la Tierra, como si se trata de una nave o de cualquier otra forma, dentro de un sistema de movimiento son posibles las mismas reglas parciales de movimiento que las que están presentes en un sistema inmóvil:

> Puesto que, al tener lugar este movimiento dentro de la Tierra, es necesario que con el movimiento de esta venga a alterarse toda relación de verticalidad y oblicuidad, pues son diferentes el movimiento de la nave y el movimiento de las cosas que están en la nave. **[50]**

Para explicar el movimiento no es necesario recurrir a una *qualitas* o una *virtus* concreta como hacía la física de Aristóteles. Bruno utiliza el ejemplo inverso e imagina que se encuentra fuera de la Tierra y lanza una piedra sobre ella. Concluye que es imposible dar en el blanco en el caso de que la piedra se lance de manera perpendicular, precisamente por el movimiento del astro. Así, Bruno se aleja por completo de Copérnico, precisamente por esta nueva concepción del movimiento totalmente incompatible con el aristotelismo. Si para Aristóteles todo movimiento se mide en proporción al centro del cosmos, para Bruno el movimiento hace referencia tan solo al sistema en el que está inserto. Manteniéndose en el ejemplo de la nave, Bruno habla de dos cuerpos lanzados desde el mismo punto: uno lo lanza un marinero que está encima del mástil, y el otro un marinero que está sobre un soporte de la misma altura que el mástil, pero situado sobre un muelle. La trayectoria oblicua del segundo será oblicua respecto al sistema de la nave, pero perpendicular respecto al sistema del muelle; la trayectoria del primero, por el contrario, será perpendicular para el sistema de la nave, pero oblicua para el sistema del muelle.

Este principio formulado por Bruno, y que Galilei retomará para formular la relatividad del movimiento, supone una crítica totalmente destructiva de la física aristotélica. A Bruno le parece que es imposible hablar de movimiento terrestre sin negar el concepto cualitativo de movimiento propuesto por Aristóteles. De todos modos, la propia definición de «movimiento natural» es errónea. Todo movimiento es natural en relación con su propio

sistema de referencia y antinatural respecto a los otros. La crítica de Bruno a la *gravitas* aristotélica implica, por lo tanto, una revisión del propio concepto de cosmos. Así como los centros del movimiento pueden ser distintos (varios sistemas), del mismo modo la *gravitas* es relativa, no esencial. Tanto la *gravitas* como la *laevitas* no se desprenden de los cuerpos en sí mismos, de su sustancia, respecto al centro del cosmos. En este sentido, Platón estaría en lo cierto cuando dice que en el cielo no existe alto ni bajo y, por lo tanto, la idea que defiende la concepción de Bruno es la de un cosmos ideado en sentido geométrico-matemático. Una vez más se ve como gracias a Platón, al celeste pensador de las ideas ultraterrenales, la física moderna ha podido aportar una crítica, por así decirlo, realista a Aristóteles, el pensador de lo empíreo del mundo. El episodio clave, aquí, es la inclinación de Bruno a considerar las cosas según un paradigma cuantitativo y no cualitativo.

Por consiguiente, si gravedad y ligereza son cualidades relativas y no esenciales, Bruno se ve obligado a considerar que estas derivan de la composición de las partes del cuerpo, con un enfoque que podría referirse más a Epicuro que a Platón. De este modo, su idea mira en la dirección del atomismo. La referencia es Lucrecio, a pesar de que aquello que lo ha motivado es el intento por conciliar varias tradiciones atomistas contra el aristotelismo cristiano.

Respecto a Bruno se ha defendido también una interpretación inversa a la de Koyré en la que nos basamos; por ejemplo, puede verse su concepción de los mínimos de la materia como inspirada por la idea cualitativa de Aristóteles. En realidad, podría demostrarse cuán auténticamente cuantitativa es la noción de materia de Bruno y, con ello, indicar la conexión que mantiene con el atomismo mecanicista del siglo XVII. En concreto, debe hacer referencia a la esfericidad de los átomos que componen la materia, que, según la descripción de Bruno, son sólidos e insensibles, lo que refleja la postura de Demócrito.[51] Los mínimos de los que habla en sentido cualitativo derivan de la agregación cuantitativa de estos átomos mecánicos; las mínimas partes de la materia que poseen cualidades se asemejan a las moléculas de la ciencia

contemporánea.

Bruno recupera otra idea fundamental de Demócrito y de Platón, que es la de una cosmología en la que el vacío no sólo es aceptado, sino que además es su parte dominante, siempre en clave antiaristotélica. Así, el vacío llega a adquirir el significado de un espacio que contiene todos los cuerpos, sin ser a su vez un cuerpo. Infinito e inmóvil, para Bruno, el espacio vacío hace posible el movimiento. Bruno, influido por De Cusa, describe un universo que es infinito, sin centro y exento de forma. Ningún astro se encuentra en un punto privilegiado respecto a todos los demás. De ahí deriva la tan discutida tesis de Bruno sobre la pluralidad de los mundos, según la cual cada habitante de cada mundo tendrá la percepción de encontrarse en el centro del universo. Efectivamente, Bruno distingue entre los soles y los planetas: unos serían fuentes de calor deshabitadas, mientras que los otros albergarían la vida.[52] Conocidas son las disruptivas consecuencias teológicas de esta idea de Bruno, que lo llevarán inevitablemente a la condena a muerte. La operación es muy sutil. Bruno aúna la teoría de Copérnico y el modelo de la pluralidad de los mundos, lo cual despierta la atención de la Iglesia católica con respecto a los problemas astrológicos.

Pero no hay que omitir los aspectos menos científicos del discurso de Bruno. Su universo es infinito y espacial, por tanto cuantitativo, pero es también animado. Se trata de la teoría de la animación universal, que puede constituir un fuerte freno en el estudio científico, precisamente por las implicaciones de naturaleza cualitativa que lleva consigo. Sin embargo, en este sentido, el objetivo polémico de Bruno sigue siendo Aristóteles y, concretamente, la teoría del motor inmóvil, central en su cosmología. De estas cosas se habla también en el escrito *De la causa, principio y uno*, en el que se expone la teoría del *anima mundi*;[53] además, en *Sobre el infinito universo y los mundos* aún se debate sobre el alma del universo, en concreto en lo referente a la inutilidad de una investigación dirigida a encontrar el motor solo y único del universo, que era a lo que impulsaba la idea aristotélica.[54] De forma análoga, la idea de las esferas celestes como lugar en el que son incrustados los planetas es criticada y desmantelada, cosa

que, como se ha visto, ya había hecho Tycho Brahe.

Por eso, Bruno, junto con la noción totalmente mecánica y cuantitativa del movimiento relativo, se vale también de una concepción absolutamente sustancial y cualitativa como es la del alma universal con el fin de explicar el movimiento. Así pues, nos encontramos ante un momento fundamental que explica el paso del aristotelismo a la física moderna, aun conservando un aspecto que podría ser interpretado como regresivo, concretamente la idea del universo animado. En efecto, cae la teoría de los lugares naturales y, junto con ella, la de los movimientos naturales, si bien aún no se ha llegado a la concepción sucesiva de la inercia, que resolverá un cierto número de problemas. Con el alma universal, Bruno intenta responder a algunas preguntas que la física aristotélica planteaba, como por ejemplo el origen del movimiento.

Puede encontrarse un eco de esta clase de posturas en Tommaso Campanella, que en *Del sentido de las cosas y de la magia* habla del animismo como una respuesta plausible a Aristóteles. Por ejemplo, en el libro III afirma que Aristóteles tuvo la necesidad de comparar un motor externo respecto a los cielos, [55] y por eso creó aquel sistema de esferas y planetas sostenidos por el motor inmóvil. Según su posición, todos los movimientos serían en cierta medida violentos, ya que incluso el movimiento natural originado por el motor inmóvil presentaría rasgos de violencia. Campanella contrapone a tal concepción la idea animista según la cual las cosas animadas son movidas por su propia forma. Del mismo modo se comportaría el cielo, cuyo movimiento debe buscarse en una virtud intrínseca suya. Dios, según la idea de Campanella, movería exclusivamente el movimiento de la generación, no el local. La virtud intrínseca de los astros de la que se habla se asemeja a lo que hoy podría entenderse al hablar de espíritu; la naturaleza propia de los astros, cuya base es el fuego, es la de moverse dando vueltas de un modo propio. [56]

Puesto que son animados, los astros siguen su alma, cuyo movimiento natural es el circular, que es considerado explícitamente como «mágico», y eso permite romper el cierre del universo aristotélico. En Bruno, y en general en las posturas de

derivación animista, sigue presente una distinción entre la física terrena y la celeste, allí donde la primera presenta características puramente mecánicas y cuantitativas, mientras que la segunda posee una base esencial y cualitativa. Todo eso sirve para demostrar el carácter discontinuo de la revolución científica y la presencia en ella, al mismo tiempo, de elementos progresivos y regresivos, o bien de intenciones regresivas que se muestran totalmente progresivas. También Tycho Brahe, central en la idea del vacío gracias a la observación de los cometas, niega sobre bases aristotélicas el movimiento de rotación de la Tierra y utiliza un ejemplo similar al aristotélico, a pesar de que hace referencia a balas de cañón que, obviamente, Aristóteles no podía mencionar. Este oscilar entre regresión y progresión, entre rupturas y recaídas, persiste en la revolución científica al menos hasta la conquista de ciertos puntos fijos, a partir de los cuales es difícil que pueda volverse atrás. Uno de ellos corresponde a los descubrimientos del discípulo de Brahe más célebre, el astrónomo praguense Johannes Kepler.

Kepler

A principios del nuevo siglo, en 1601, Kepler hereda el puesto que había ocupado Brahe, el de astrónomo y matemático en la corte imperial de Praga. A diferencia de su maestro, Kepler es partidario convencido de la hipótesis de Copérnico y en esa línea plantea una defensa de la rotación terrestre y lo hace respondiendo a las objeciones de Brahe. Para él, la tesis de su maestro aún está marcada por el prejuicio ptolemaico, y él la rebate con palabras que en cierta manera pueden sorprender. A pesar de la rotación, el cuerpo cae perpendicularmente porque en el proceso no se mueve solamente la Tierra, sino que se mueven también las cadenas magnéticas con las que el cuerpo es atraído a la Tierra, opinión que ya aparece expresada en su *Astronomía nova*.[57] Según esta teoría, el movimiento de la Tierra sería indiferente respecto a la caída del cuerpo, encadenado como está a la Tierra. Kepler, aquí, se refiere a la hipótesis de William Gilbert, expresada en *De magnete*, donde la Tierra es considerada justamente un gran imán. Por ese motivo, la respuesta de Kepler coincide básicamente con la de Bruno, pero se aparta de ella en el fondo, ya que la Tierra-nave de este no tiene conexiones magnéticas con el cuerpo.

En las cadenas fijas de las que habla Kepler se ve aún la influencia de la *qualitas* física, ya que se mantiene una fuerte distinción entre las cuestiones mecánicas y el sistema celeste. Koyré resalta precisamente este punto, haciendo hincapié en el hecho de que Kepler no admite el origen mecánico del sistema ofrecido por Bruno. Para él se trata de un sistema físico y de conexiones reales de cosas reales.[58] Desde este punto de vista, Kepler es tan aristotélico como Brahe, porque concibe el movimiento y la quietud como dos estados de nivel cualitativo distinto, lo cual es totalmente retractado por el mecanicismo de Bruno. A pesar de ello, Kepler es el primero en introducir el término «inercia», aunque se refiere a él sólo en la quietud; efectivamente, la inercia sería la tendencia natural de un cuerpo a la quietud y no, como sucede más tarde, a mantener el estado en el que se encuentra. Con ello, se establece la

inercia como una especie de privación de movimiento, sin que con ello se admita el centro de la Tierra como punto de referencia, ya que eso iría contra la idea aristotélica de los movimientos naturales.

Podría decirse que estas ideas de Kepler se configuran como una *felix culpa*, porque constituyen el estímulo que lo impulsa a realizar una serie de descubrimientos científicos todavía hoy válidos. La necesidad de mantener una concepción general del mundo, asociada a la necesidad también de ofrecer una explicación a los fenómenos, lo han llevado, por ejemplo, por la vía de rechazar el animismo inicial a favor del mecanicismo. Si la causa física que Kepler cree haber constatado es errónea —aquel panmagnetismo con el que explica la atracción de la Tierra—, es a partir de ella que Kepler formula una serie de leyes geométrico-matemáticas que aún hoy en día siguen siendo válidas, por lo menos en la física clásica newtoniana: también el error, en el desarrollo del pensamiento científico, puede tener una función positiva.

La vía a través de la cual llega a formular sus leyes es de naturaleza matemática, siguiendo en ello un legado platónico. Es más por fe que por razón que está convencido de la estructura geométrica del universo, a pesar de que en él la necesidad observacional es fuerte, derivada de la herencia también material de Brahe, en la dirección a una explicación naturalista de las leyes matemáticas. Hay en él una fuerte competencia entre observación y fe matemática, lo cual le lleva a autocorregirse inmediatamente. La herencia platónica, recordemos que Kepler se inspira en Copérnico, es visible especialmente en la concepción de la geometría celeste, que hace referencia a los cinco sólidos de Platón y recupera una idea de inscripción de los sólidos en las esferas. La fe que lo guía desemboca en la creencia de que Dios, en la creación, fue guiado por criterios geométricos en la construcción del cosmos, lo que recuerda a la imagen platónica del demiurgo que, creando, observa el mundo de las ideas.

Brahe había dejado en herencia un gran número de observaciones, muchas de ellas relacionadas con el movimiento de Marte, cuyas irregularidades orbitales persiguen durante mucho tiempo a Kepler. En 1609 publica *Nueva astronomía*, donde el

movimiento de Marte puede ser explicado únicamente aceptando diversas hipótesis de origen ptolemaico. En lugar de hablar de un epiciclo, Kepler se refiere a un *punctum aequans* en el que el planeta cambiaría de velocidad.[59] Desde un punto de vista matemático, eso no constituye ninguna novedad, pero desde un punto de vista físico infringe totalmente el precepto platónico de la armonía del movimiento. Precisamente aquí es posible observar el momento histórico en el que Kepler realiza una de las modificaciones extraordinarias de la historia de la ciencia. La suya es, efectivamente, una verdadera recuperación de la fractura entre astronomía matemática y astronomía física. Matemáticas y física, cantidad y calidad se ensamblan así dentro de una hipótesis mecanicista que renuncia al carácter plenamente circular de las órbitas. Para explicar la variación de velocidades hay que teorizar sobre una órbita de tipo elíptico. Es así como Kepler llega a formular sus leyes.

Primera ley: las órbitas de los planetas son elipses. El Sol ocupa uno de los dos focos.

Segunda ley: la velocidad orbital de cada planeta es variable de tal manera que un segmento que une al Sol con el planeta (denominado radio vector) en tiempos iguales barre áreas iguales de superficie de la elipse.

Si los tiempos de trayectoria del viaje alrededor del Sol en la sección de elipse en la que el planeta está cercano al Sol son iguales a los tiempos de trayectoria en la sección en la que está lejano, entonces el planeta aumentará de velocidad a medida que se acerque a la estrella. De este modo, la relación matemática obtiene una no uniformidad que permite renunciar a la teoría excesivamente compleja y nada intuitiva de los epiciclos y de todo lo de origen ptolemaico. Como hemos dicho, esta formulación correcta se basa en una explicación física errónea, a pesar de que en Kepler se asiste al primer intento real de elaborar una física celeste atribuible a la dinámica terrestre. Efectivamente, el título completo de la obra de 1609 es *Astronomia Nova* ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΤΟΣ *seu physica coelestis*, que indicaba la distancia del animismo cultivado

hasta 1595. Antes de morir, Kepler quiere reemplazar un hecho que se remonta a aquellos años en los que habla del *anima motrix* de los planetas, con la expresión *vis*, 'fuerza'. [60] En él no está en juego simplemente una variación terminológica, sino un verdadero cambio de paradigma: el alma considera el mundo como animal divino, mientras que la fuerza, *vis*, lo concibe como el mecanismo de un reloj. Este episodio ha sido interpretado como el acto de nacimiento del mecanicismo moderno, por el cual el cosmos se parecería a un mecanismo de relojería. [61]

Se ha dicho que Kepler concibe la Tierra como un imán y considera el Sol como el origen del movimiento por la radiación de fuerzas que genera su rotación. Al crear un torbellino, el Sol genera el movimiento de los planetas, que son arrastrados al torbellino de sus fuerzas. En estas ideas se percibe la influencia tanto de la tradición hermética asociada al Sol como origen, como del atomismo de Demócrito, del que deriva la hipótesis del torbellino. También en este caso, el intento de explicar matemáticamente una teoría equivocada ha llevado a una ley que sigue siendo válida, la tercera ley de Kepler.

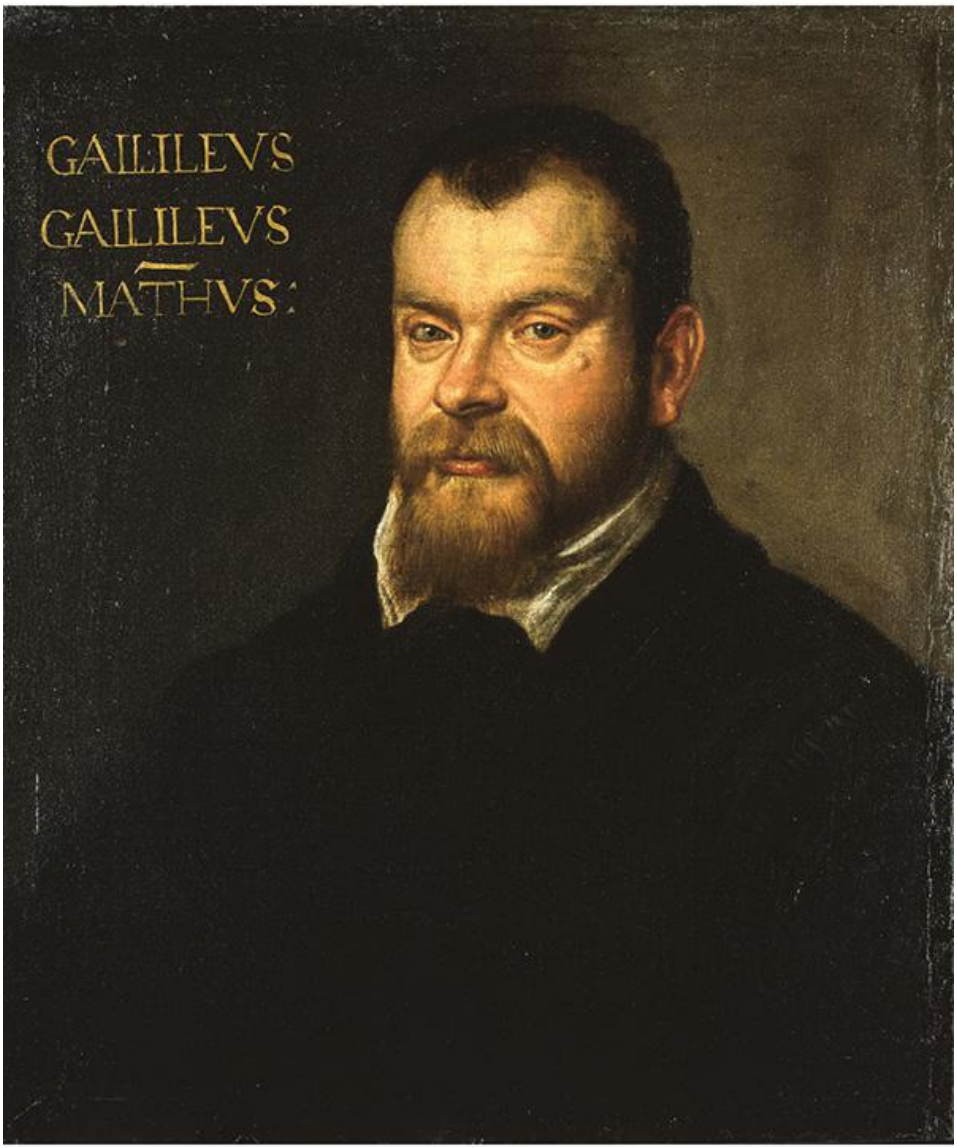
Tercera ley: para un planeta dado, el cuadrado de su período orbital es proporcional al cubo de su distancia media al Sol.

De este modo, se establece una relación de proporcionalidad inversa entre el Sol y los planetas, en la cual la fuerza magnética, retomada como hemos visto por Gilbert, tiene la función de explicar el movimiento elíptico. Estas posiciones serán consideradas insostenibles, especialmente por Galileo. Pero no sólo por él, también por Giovanni Battista della Porta, científico, mago y alquimista de la época. El contexto en el que se inscribe la teoría de Gilbert, que de algún modo podría ser considerada como anticipo general del principio de atracción, es el de la pasión renacentista por la alquimia y la magia. Efectivamente, para explicar por qué los cuerpos se atraen magnéticamente, habla de efluvios que, como «brazos extendidos» *(extensis brachijs)*, aferran y atraen a partir de tierra y agua. [62] También respecto al magnetismo de Kepler es difícil decir si su fuerza magnética puede ser equiparada a la

gravedad.

Pero si en el *Mysterium* las órbitas de los planetas son consideradas aún como circulares, para justificar la forma elíptica Kepler recurre a lo que ha aprendido de la teoría magnética de Gilbert, ampliando a todos los planetas lo que se había atribuido sólo a la Tierra.

Finalmente, Kepler rechaza aquella mística solar presente en los escritos animistas; los principios que colaboran en el movimiento de las esferas son dos: atracción y efecto de arrastre del Sol. Sin impulsos, los cuerpos permanecerían inmóviles por efecto de su concepción de la inercia hacia la situación de reposo. En todo caso, quedan muchos puntos oscuros que no permiten tener una visión clara de cuán «moderna» era la visión científica de Kepler. También en este caso, como se ha observado aquí, la revolución científica da un paso adelante sustancial al que se llega también, y podría decirse sobre todo, por medio de hipótesis erróneas y a través de artificios conceptuales destinados a explicarlas. La imagen de una ciencia que progresa de forma lineal, sin saltos, sin hipótesis *ad hoc*, pierde su propia consistencia exactamente en el mismo momento en que nace: la revolución científica del siglo XVII. Y eso lo confirmará el científico cuyo nombre ha caracterizado, más que cualquier otro, la época: Galileo Galilei.



Galileo Galilei a sus cuarenta años retratado por Tintoretto (1605-1607)

Galileo (I): la vida

Galileo Galilei nace en Pisa en 1564 en una familia cuyos orígenes provienen de la media alta burguesía florentina. Su apellido procede de un Galileo que en 1343 es llamado, junto con otros once, a dar a la ciudad un gobierno de carácter democrático a consecuencia de la expulsión del duque de Atenas. Vincenzo Galilei, padre de Galileo, era mercante, y a ello se debe su traslado a Pisa, donde nace su hijo. Vincenzo era el típico hombre que había crecido en el seno de la cultura florentina de orientación humanista, en la que se profesaba especialmente el platonismo y en la que se estudiaban las teorías místicas de la tradición hermética; este legado familiar tendrá, por tanto, un cierto peso en la formación de Galileo. Su padre había demostrado tener unas dotes musicales notables, lo cual lo convirtió en una persona destacada en el ámbito de la cultura toscana con obras como *Diálogo sobre la música antigua y moderna*; aquí ya puede entreverse una anticipación de esa pasión del hijo por la escritura dialógica, de marcada tradición platónica, y por su orientación hacia el pitagorismo ya presente en los escritos teóricos musicales del padre.

No se tienen noticias concretas de los primeros años de la vida de Galileo. Se sabe, como primera fecha, la de 1574, cuando con diez años se muda con la familia a Florencia y retoma los estudios que había iniciado en Pisa. El 5 de octubre de 1580, a los diecisiete años, se traslada de nuevo a Pisa, donde se inscribe en la facultad de los artistas y empieza a estudiar medicina, posiblemente por voluntad de su padre. Como es costumbre en esa época, la introducción al estudio de las asignaturas científicas incluye la física aristotélica, que constituye en concreto un sistema filosófico y científico denso que otorga una buena preparación funcional en las disciplinas. Es probable que Galileo, heredero de una cultura renacentista que le venía de su padre, a pesar de la rigidez de la Academia, ya fuera poco comprensivo hacia ese modelo. Su

experiencia en la Universidad de Pisa no resulta afortunada y, tal y como nos informa Vincenzo Viviani, su primer biógrafo, cuatro años después regresa a Florencia, con lo que renuncia a obtener un título académico. [63]

Apenas regresa a Florencia pasa a ser discípulo de Ostilio Ricci da Fermo, profesor de la Academia florentina del diseño. En esos años en Florencia tiene fuerza una corriente que observa con interés los escritos de Euclides y la posibilidad de una aplicación concreta de las matemáticas, concretamente en el ámbito de la balística y la hidráulica. A partir de esta clase de estudios e intereses, Galileo escribe *Theoremata circa centrum gravitatis solidorum*, que queda incompleta, simplemente como fragmentos, y *La bilancetta (La balanza hidrostática*) (1586), investigación dirigida a describir el peso específico de los cuerpos. En esos años se procura un sustento mediante lecciones particulares que imparte en Florencia y Siena, mientras hace circular de forma privada sus propios escritos para obtener fama. En 1587, con el apoyo del marqués Guidobaldo del Monte, solicita la cátedra de matemáticas en la Universidad de Bolonia, pero le es rechazada; realiza la misma petición en Pisa en 1589, que esta vez es aceptada. En esos primeros años enseña a partir de textos de Euclides y Ptolomeo; escribe una serie de trabajos que confluyen en *De motu*, pero que permanecen inéditos en vida de Galileo, a pesar de que el autor ha revisado su forma tres veces. [64] Aquí puede verse la voluntad de Galileo de elaborar una escritura que pudiera ser comunicativa también fuera de las restrictivas paredes de la academia, cosa que conseguirá sólo posteriormente. Su carácter adverso a la vida académica y a la autoridad en general puede percibirse también en una pequeña obra sarcástica en versos que Galileo escribe en Pisa, *Capitolo contro il portar la toga (Capitulo en contra de llevar toga),* motivado por una ordenanza que prescribía el uso público del hábito talar por parte de los profesores. El escrito ofrece una imagen menos habitual y más desenvuelta de Galileo Galilei.

Galileo Galilei, En contra de llevar toga

Me hacen sufrir esos
que van buscando el bien supremo,
pero aún no lo han hallado.
Y voy imaginando con el cerebro
que eso ocurre sólo
porque no se encuentra donde lo están buscando.
Estos doctores no lo han entendido bien,
no van por el buen camino,
que les pueda conducir al bien supremo.
Porque, en mi opinión,
quien quiere encontrar algo
debe recurrir a la fantasía.
Y jugar a inventar, y a adivinar;
y si tú no puedes ir en una dirección,
otros miles caminos pueden ayudarte.
Esto parece que nos enseña la naturaleza,
que cuando uno no puede llegar por lo corriente,
va derecho a un camino más oscuro.
El estilo de la invención es muy variado;
pero para encontrar el bien yo he experimentado
que hay que proceder de forma opuesta:
Busca el mal y lo hallarás;
el bien supremo y el mal supremo
aparecen con facilidad.
Esta es una receta general:
quien quiere saber qué es la abstinencia,
primero debe saber qué es el carnaval.
Y ver la diferencia entre ellos;
y queriendo conocer los pecados,
ver si el cura le da penitencia.
Y si quieres conocer a los desdichados,
hombretones tristes y sin discreción,
basta que conozcas a los curas y frailes,
que son todos bondad y devoción.
Y esta vía nos hace llegar al fondo,
y deshace el entuerto a nuestra cuestión

En Pisa, el salario no es nada alto, de hecho, Galileo lo considera mísero, por lo que aspira a otra cátedra: la de Matemáticas en la Universidad de Padua, que desde el fallecimiento de Giuseppe Moletti, en 1588, está vacante por falta de un sustituto digno. Una vez más, el marqués del Monte, junto con el cardenal Francesco, se interesan por la suerte de Galileo y solicitan la candidatura de este a sus amistades venecianas. El 26 de septiembre de 1592 es nombrado para dicho cargo y en otoño se muda a Padua para ocupar el puesto. El 7 de diciembre, frente a un auditorio bien dispuesto, recita su lección magistral.

El ambiente paduano y veneciano se manifiesta especialmente favorable al carácter de Galileo, que ya en Pisa había mostrado rasgos de un marcado antiacademicismo. Así, vuelven a surgir los problemas a los que ya había empezado a enfrentarse con Ricci en Florencia, y que en Pisa tiene que defender prácticamente en soledad. En concreto, se hace urgente la cuestión de su naturaleza práctica y técnica, desde el momento en que Galileo no cree que las cuestiones físicas puedan resolverse tan solo con la especulación intelectual. Y precisamente este binomio especulación-experiencia, que entrelaza por una parte la matriz platónica, y por la otra la atomista y demócrita, caracterizará totalmente la vicisitud intelectual e investigativa de Galileo. En Padua organiza un laboratorio para ahondar en las cuestiones técnico-prácticas, laboratorio que a partir de 1599 pasa a manos de un artesano asalariado. En esos años, además, prosigue con la enseñanza particular, para garantizarse una entrada mayor de dinero, como verdadero hombre práctico surgido de la cultura renacentista, y asimismo no deja de contribuir a extender su fama. En ese período mantiene una relación con una mujer veneciana, María Gamba, que le es fiel durante todo el período paduano. De esa relación nace una hija, Virginia, y al año siguiente otra, Livia, seguida de un hijo varón, Vincenzo, en 1606. Galileo reconoce legalmente a los tres.

En 1607, un estudiante suyo de origen milanés, Baldassarre Capra, lo acusa de plagio por haberse atribuido la invención de un compás geométrico para practicar mediciones. La acusación es manifiestamente falsa, ya que Galileo no puede haberse declarado

inventor de un instrumento ya conocido, y vence la causa. En los años paduanos compone *Le meccaniche (Las mecánicas),* que supuestamente sirven como manual para sus propios estudiantes, y en las cuales perfecciona los principios ya desarrollados en los escritos de *De motu*. La importancia de estos trabajos radica en el hecho de que, si bien aún sin pulir, contienen gran parte de las críticas y descubrimientos que Galileo definirá después en los escritos del período de su madurez. En 1597 empieza a mantener una correspondencia con Kepler y gracias a esas cartas se tiene conocimiento de su fe copernicana al menos desde ese año, aunque algunas alusiones en *De motu* podrían fecharla ya en los años de Pisa.

En 1604 se asiste al nacimiento de una nueva estrella, a la que actualmente llamamos supernova, y Galileo queda muy impresionado por el fenómeno, hasta el punto de impartir clases sobre esa cuestión, ya que constituye una prueba contra la inmutabilidad de los cielos. Cinco años más tarde, en 1609, como explica en la *Gaceta sideral*, publicado al año siguiente, le llegan rumores de lo siguiente:

> Un cierto neerlandés había fabricado un anteojo, merced al cual los objetos visibles, aunque muy alejados del ojo del espectador, se veían nítidamente como si estuviesen cerca. **[65]**

Galilei se empeña en construir un ejemplar de telescopio suficientemente potente como para permitirle observar todo lo que ocurre en el cielo. Un año después puede experimentar con su propio instrumento en Venecia, desde el campanario de San Marcos, para permitir a sus amigos admirar el paisaje de la campiña véneta. El gobierno veneciano queda impresionado, por lo que le asegura a Galileo la cátedra de por vida y le otorga un sueldo increíblemente opulento, lo cual genera ciertas disensiones en la Academia.

El observatorio con el telescopio le permite realizar descubrimientos únicos en su campo, que acrecientan su fama también en Florencia, ciudad que continúa frecuentando. El primer hallazgo que hace es el relacionado con la superficie lunar, que con la vista aumentada aparece no lisa; poco después descubre los

satélites de Júpiter. Consciente de la magnitud de su descubrimiento, escribe en una carta:

> Inundo de infinito estupor, infinito es mi agradecimiento para con Dios, que se ha complacido en hacerme el primer observador de tan adorable cosa durante tantos siglos oculta. **[66]**

La *Gaceta sideral* contiene la descripción de estas observaciones y descubrimientos, y Galilei la publica en 1610 y la dedica a Cosme II de Toscana, de la familia de los Médicis, que en sus permanencias florentinas había sido discípulo de Galileo. El impacto del opúsculo es extraordinario y el nombre de su autor sobrepasa los Alpes y llega a ser reconocido en Francia, Alemania y Praga. No tiene la misma aceptación entre la comunidad científica oficial, que se muestra escéptica ante sus descubrimientos, lo cual provoca la ira de Galileo, quien lo considera pura envidia.

A pesar de que Padua y Venecia lo han acogido con los brazos abiertos y le han permitido perfeccionar sus propios estudios y alcanzar una fama prácticamente sin límites, su proyecto es regresar a su tierra, y lo consigue, ya que vuelve a Florencia de nuevo en 1610, concretamente el 12 de diciembre. Y aquí, con el paisaje del Pian dei Giullari —que, como pretende el periodista italiano Giovanni Spadolini, está dominado por «las sombras de la libre investigación, del libre estudio, del libre pensamiento, originado por Galileo para llegar a nosotros»—, **[67]** se desarrolla la fase más intensa de su vicisitud intelectual y biográfica. Se trata de un plan bien trazado: Cosme II fue el primero en ser informado de los nuevos descubrimientos, y también a quien había dedicado la *Gaceta sideral*, y los nuevos satélites de Júpiter, descubiertos gracias al telescopio, se bautizaron como «medíceos».

Cuando se traslada a Florencia, se separa de su pareja paduana, con la que deja a su hijo Vincenzo. Se lleva consigo a sus hijas, a las que cuando cumplen dieciséis años obliga a entrar en el convento para tomar los votos. Mientras tanto, el aristotélico de Padua Cesare Cremonini y el matemático boloñés Giovanni Antonio Magini intentan desautorizar los descubrimientos de Galileo diciendo que ni siquiera con el telescopio se ve nada de lo que él ha descrito.

Pero la opinión de Kepler resulta decisiva, cuando en 1611 confirma haber observado los satélites de Júpiter. Los años sucesivos a 1611 fueron años de ásperas polémicas, también en la sede eclesiástica, debido al heliocentrismo que se defiende con firmeza por la observación de las fases del planeta Venus.

Pero es en 1614 cuando empieza la verdadera acusación de la Iglesia respecto a las teorías galileanas, cuando el dominico Tommaso Caccini, en Santa María Novella, Florencia, se pronuncia contra el heliocentrismo y habla del «arte diabólico de las matemáticas» que sugiere esta clase de teorías. Ha empezado la batalla de la Iglesia respecto al sistema copernicano, que hasta ese momento ha sido admitido, al menos como hipótesis matemática. Pero tampoco en Roma el clima es sereno, ya que Belarmino, que tiene el papel de defensor de la ortodoxia, empieza a hablar con cierta frecuencia contra la idea de que el Sol está en el centro del cosmos, hipótesis que desmentiría el milagro de Josué cuando este detiene el astro. La Congregación de la Inquisición, presidida por el Papa, se reúne en febrero de 1616 y en el mismo mes condena las dos proposiciones relativas al heliocentrismo; la primera dice: «Sol est centrum mondi et omnio ommobilis motu local» (El sol es el centro del mundo y permanece inmóvil.); la segunda: «Terra no est centrum mundi nec immobilis, sed secundum se tota moventur, etiam motu diurno» (La Tierra no es el centro del mundo, ni permanece inmóvil, sino que se mueve, y lo hace con un movimiento diurno.). Ambas son declaradas heréticas en la sentencia del 24 de febrero de ese mismo año. Dos días, después, el 26, Galileo es llamado ante la congregación y es amonestado, bajo pena de cárcel, a no enseñar ni promover teorías relacionadas con las dos proposiciones condenadas.

Los conocimientos de Galileo y el interés del gran duque hacen que la Congregación de la Inquisición sea benévola con él y no lo condene abiertamente, limitándose a amonestarlo de aquella manera. Así que en junio Galileo regresa a Florencia con una media victoria. Había evitado la condena, pero la mayor autoridad del momento había prohibido aquello en lo que creía y lo que había descubierto.

En 1618 en el cielo de Europa aparecen tres cometas, uno de los cuales presenta dimensiones descomunales. El acontecimiento sacude profundamente a la comunidad científica, como ya habían hecho antes las observaciones de Tycho Brahe respecto al paso de esta clase de cuerpos. Los padres jesuitas, mediante un discurso de Horacio Grassi, intentan mantener una postura que no contradiga la decisión de la congregación. Precisamente, el discurso de Grassi ofrece a Galileo la posibilidad de medirse con estas teorías de una forma totalmente racional. La obra que surge de esta situación, y que Galileo perfecciona y reescribe durante mucho tiempo, es *El ensayador*, considerado por muchos el manifiesto de la nueva ciencia. Consiste en un tratado en forma de cartas en el que Galileo utiliza todas las armas que le ofrecen sus capacidades intelectuales, y hace gran alarde de ironía y virtuosismo en el razonamiento. El sentido y el valor profundo de la obra es poner de relieve la racionalidad que es inherente a la nueva ciencia, que más que cualquier otra cosa se opone al carácter arbitrario del saber tradicional. Precisamente en *El ensayador*, para marcar la distancia entre la nueva ciencia y la tradición, encontramos la acertada metáfora del universo como libro escrito en caracteres matemáticos. De este modo, Galileo muestra oponer una autoridad a otra: la primera está constituida por el libro del universo, mientras que la segunda lo está por el de la tradición. También la primera es vista como un libro, pero en este caso como un libro que en cada página lleva la firma manuscrita de Dios, mientras que el libro de la tradición tiene como firma la de los defensores del culto.

La nueva ciencia está preparada para ser puesta en práctica, y a los defensores de su capacidad de explicar el mundo no les basta con tener la certeza, sino que quieren un reconocimiento oficial. Galileo deposita sus esperanzas sobre todo en el cardenal Maffeo Barberini, que en agosto de 1623 se erige en el trono de Pedro con el nombre de Urbano VIII. Barberini está en contacto con Galileo ya desde el tiempo de la enseñanza en Pisa y su relación no se ha interrumpido nunca. Parece que el físico tenía razón de alegrarse, puesto que Barberini se ha decantado en varias ocasiones en defensa de los seguidores de Galileo. Este, como homenaje, le dedica al nuevo papa *El ensayador*. Gracias a esta nueva condición

que va madurándose en Roma, Galileo empieza a redactar la obra que aún hoy lo caracteriza más que cualquier otra: *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Se trata de una obra dialógica, en la que Galileo se apropia de las armas de la tradición platónica y socrática, reconsideradas por la fortuna que han hallado en el Renacimiento. La mayéutica de Sócrates, tal y como la describe Platón, es el recurso que emplea en el diálogo hipotético entre tres científicos: el aristotélico Simplicio, personaje totalmente inventado y partidario de la tradición; Giovanni Francesco Sagredo, a quien Galileo había conocido y que en el diálogo representa al culto hombre de mundo interesado en la ciencia y encarna, por así decirlo, la opinión de los lectores; y, finalmente, Filippo Salviati, astrónomo al que el autor rinde homenaje haciéndolo portavoz de sus ideas.

El *Diálogo* de Galileo se divide en jornadas, concretamente en cuatro. En él se discuten los temas candentes del debate: la comparación entre heliocentrismo y geocentrismo, la rotación de la Tierra y el problema de las mareas respecto a la hipótesis de los movimientos terrestres. Aunque se trata de una ficción literaria, la escritura de Galileo es tan intensa que hace que nadie que lo lea libre de prejuicios pueda albergar dudas: la hipótesis heliocéntrica es la que explica mejor la manera en que se ha formado el universo. No sólo a la luz de las observaciones, sino como evidencia del razonamiento racional. El *Diálogo* recibe el imprimátur en 1632. Pero para su publicación todavía tiene que esperar de nuevo el consenso de Roma, que, a pesar de su tardanza, finalmente llega, y el libro sale a la luz en febrero del mismo año.

La obra despierta inmediatamente una aprobación unánime en la comunidad científica, y también Campanella se interesa por conseguir una copia. Pero ese fervor pone en alerta a las instituciones aún adversas a Galileo y a la hipótesis copernicana. Ya en julio del mismo año es ordenada una nueva revisión del texto y el 21 de ese mes, por mandamiento del pontífice, el inquisidor de Florencia recibe el encargo de retirar todas las copias del libro, que, por tanto, tiene que ser nuevamente autorizado. En el *Diálogo*, Galileo afirma que los decretos divinos son independientes de la

razón humana, pero quien pronuncia esas palabras es Simplicio, que resulta ser el derrotado del diálogo. Urbano VIII toma esa afirmación como una ofensa a su persona y, de los favores iniciales, pasa rápidamente a sentir una clara aversión hacia Galileo. Parecía que el autor del *Diálogo* quisiera, o al menos pudiera, defender a los herejes en general y restar poder a la tradición de la Contrarreforma.

Los acontecimientos se precipitan con una cierta celeridad y la Congregación decide acusar al autor del *Diálogo*. Galileo pide ser juzgado en Florencia por motivos de salud, aunque en realidad lo hace por temor de caer en manos de las autoridades romanas. Pero Niccolini le advierte de que quizá haya resultado imprudente, por no decir peligroso, defender el libro, y le aconseja que vaya personalmente al Estado Pontificio. Es mejor para él dirigirse a Roma y «retractarse de la forma que quieran los cardenales». Gracias a la intervención del inquisidor florentino, se le concede una prórroga a Galileo, pero en diciembre de 1632 se le conmina a dirigirse a Roma, bajo pena de arresto. Llega a la ciudad y durante unos meses vive en Villa Médici, donde es acogido con todos los honores y el afecto posibles. El 12 de abril de 1633 se entrega al Santo Oficio, donde tiene lugar el primer interrogatorio en el que se pretende que confiese haber infringido la amonestación de 1616 respecto a las dos proposiciones juzgadas heréticas. Tras algunas sesiones, el 30 de abril Galileo desautoriza su propia obra y declara que, revisada después del interrogatorio, le parece como si estuviera escrita por otro autor y admite sus propios errores. El tribunal, satisfecho, se muestra clemente con el imputado y, en lugar de enviarlo a la cárcel, decide confinarlo a Villa Médici, en una condición que actualmente definiríamos de arresto domiciliario. Sólo puede relacionarse con los familiares y el personal doméstico, y tiene la obligación de presentarse ante el Santo Oficio cada vez que le sea requerido. Sin embargo, y desgraciadamente para él, el caso no queda cerrado. El 21 de junio es convocado nuevamente ante el tribunal y tiene que sufrir una última humillación bajo la amenaza de la tortura, que le obliga a confesar su fe copernicana también en los años sucesivos a 1616. Así, el 22 de junio de 1633, es conducido ante la Congregación en solemne asamblea, donde

pronuncia su abjuración. El tribunal, por motivos de salud, le concede continuar residiendo en Villa Médici, a donde se traslada humillado en su inteligencia y en sus investigaciones y donde permanece durante cinco meses. El tribunal no está tan interesado en sancionar a Galileo como en hacer pública su derrota y, más aún, anunciada con sus propias palabras. La libertad no dura mucho, porque tras un breve período con la familia Piccolomini, en Siena, el Santo Oficio, en diciembre de 1633, le constriñe de nuevo a permanecer arrestado en su villa de Arcetri, donde muere ocho años después, el 8 de enero de 1642.

Pero su retiro no coincide con la finalización de toda actividad. En 1634 escribe *Discurso y demostración matemática en torno a dos nuevas ciencias*, que es publicado en los Países Bajos en 1638. El texto, siempre en forma dialógica y con los mismos personajes de *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, ratifica su ingreso en la física moderna.

La abjuración de Galileo

Yo, Galileo, hijo del difunto Vincenzo Galileo, de Florencia, a los setenta años de edad, siendo citado personalmente a juicio y arrodillado ante vosotros, los eminentes y reverentes cardenales, inquisidores generales de la República universal cristiana contra la depravación herética, teniendo ante mí los Sagrados Evangelios, que toco con mis propias manos, juro que siempre he creído y, con la ayuda de Dios, creeré en lo futuro todos los artículos que la Sagrada Iglesia católica y apostólica de Roma sostiene, enseña y predica. Por haber recibido orden de este Santo Oficio de abandonar para siempre la opinión falsa que sostiene que el Sol es el centro e inmóvil, siendo prohibido el mantener, defender o enseñar de ningún modo dicha falsa doctrina; y puesto que después de habérseme indicado que dicha doctrina es repugnante a la Sagrada Escritura, he escrito y publicado un libro en el que trato de la misma condenada doctrina y aduzco razones con gran fuerza en apoyo de la misma, sin dar ninguna solución; por eso he sido juzgado como sospechoso de herejía, esto es, que yo sostengo y creo que el Sol es el centro del mundo e inmóvil, y que la tierra no es el centro y es móvil, deseo apartar de las mentes de vuestras eminencias y de todo católico cristiano esta vehemente sospecha, justamente abrigada contra mí; por eso, con un corazón sincero y fe verdadera, yo abjuro, maldigo y detesto los errores y herejías mencionados, y en general, todo error y sectarismo contrario a la Sagrada Iglesia; y juro que nunca más en el porvenir diré o afirmaré nada, verbalmente o por escrito, que pueda dar lugar a una sospecha similar contra mí; asimismo, si supiese de algún hereje o de alguien sospechoso de herejía, lo denunciaré a este Santo Oficio o al inquisidor y ordinario del lugar en que pueda encontrarme. Juro, además, y prometo que cumpliré y observaré fielmente todas las penitencias que me han sido o me sean impuestas por este Santo Oficio. Pero si sucediese que yo violase alguna de mis promesas dichas, juramentos y protestas (¡que Dios no quiera!), me someto a todas las penas y castigos que han sido decretados y promulgados por los sagrados cánones y otras constituciones generales y particulares contra delincuentes de este tipo. Así, con la ayuda de Dios y de sus Sagrados Evangelios, que toco con mis manos, yo, el antes nombrado Galileo Galilei, he abjurado, prometido y me he ligado a lo antes dicho; y en testimonio

de ello, con mi propia mano he suscrito este presente escrito de mi abjuración, que he recitado palabra por palabra.

En Roma, en el convento de la Minerva, 22 de junio de 1633; yo, Galileo Galilei, he abjurado conforme se ha dicho antes por mi propia mano.

Galileo (II): entre física, astronomía y filosofía

Hacia la nueva ciencia

Galileo es, en todos los sentidos, un autor del siglo XVII. Aunque nacido en 1564, escribe fundamentalmente toda su obra ya en esta centuria. En 1590 publica *De motu*, en el que declara sus propias deudas respecto a los estudios antiguos de Arquímedes a propósito de la fusión entre investigación física y matemática, y en el que el nombre de Arquímedes es empleado a menudo en oposición a Aristóteles. Su principal objetivo es realizar una crítica lo más concluyente posible de la física aristotélica, dato que se desprende concretamente de la densa correspondencia que mantiene con los científicos de su tiempo. El paradigma científico y teórico al que se refiere su investigación mira, por ejemplo, hacia la denominada física del ímpetu desarrollada por Ockham y se beneficia de los trabajos de Giambattista Benedetti, astrónomo y matemático veneciano fallecido en 1590. **[68]** En los escritos de Benedetti se recurre a la noción de ímpetu para oponerse a la determinación aristotélica del movimiento violento. Efectivamente, según los preceptos de Aristóteles, para desencadenar el movimiento violento —que, recordémoslo, se diferencia precisamente por ese aspecto del elemento cualitativo del movimiento natural, que la física va desmontando lentamente—, siempre es necesario que exista un motor. El concepto de ímpetu, por el contrario, tiende a desvincular el cuerpo de la necesidad de un motor, y concibe este tipo de movimiento como inherente al cuerpo mismo. Benedetti lo compara con una especie de virtud adquirida, que se inscribe de una forma tanto más profunda en el cuerpo cuanto más prolongado es el movimiento, como si el *ímpetus* se acumulara, imprimiéndose en

este *ad infinitum*.

La reanudación galileana de esta teoría tiene, por lo tanto, un valor en contraposición al aristotelismo. En su primer manuscrito critica los conceptos de «pesadez» y de «ligereza», que en aquella teoría se han concebido como cualidades, mientras que Galileo ahora ofrece una definición relativa y, en concreto, las pone en relación con el medio en el que se encuentra el cuerpo. Según su visión, la velocidad en la caída de los cuerpos no es proporcional a su peso: lanzar *ex alta turri* **[69]** dos masas de peso distinto significa que llegarán al suelo en el mismo momento. Pero su trabajo se extiende a la que podríamos describir como una polémica cultural en el interior de la academia, lo cual insta a requerir la presencia de un docente de física desde Padua. De hecho, la enseñanza se realiza sobre la base de tres textos: los *Elementos*, de Euclides; el *Almagesto*, de Ptolomeo; y las cuestiones de mecánica de la obra *Física*, de Aristóteles, lo cual obligaba a Galileo a enseñar a partir de textos que, en realidad, critica. Por ese motivo compone una serie de apuntes, *Le meccaniche (Las mecánicas),* publicados después por el padre Mersenne bajo el título de *Les mécaniques de Galilée*.

En 1597, vuelve el interés por los experimentos sobre la expansión del aire a través del calor, como informa Viviani, gracias a los cuales, desarrolla un instrumento para medir la temperatura; Viviani dice:

> La invención del termómetro de vidrio, con agua y aire, para distinguir el frío del calor y las variaciones de temperatura de la región. **[70]**

Sobre el mismo camino, su discípulo Torricelli desarrollará el barómetro. Galilei emplea el termómetro para establecer las temperaturas y, sobre todo, para reconocer cómo un instrumento adecuadamente graduado resulta más preciso que las sensaciones humanas. Así, midiendo el calor, Galileo da un paso más en el camino de reconducir las características cualitativas a definiciones de tipo cuantitativo. De una forma análoga, también su celebérrimo empleo del telescopio se incluye en el mismo orden teórico.

Como se ha dicho, Galileo escribe y publica ya en edad tardía. En 1623 ve la luz *El ensayador*, que se considera el verdadero manifiesto del método experimental y, por lo tanto, de la ciencia moderna en su conjunto, pero que no contiene ninguna novedad notable respecto a lo que Galileo había elaborado hasta entonces. El problema del que parte tiene que ver con la naturaleza de los cometas y demuestra estar fuertemente influenciado por el planteamiento de Demócrito, en el intento de reconducir lo cualitativo a lo cuantitativo. Sin duda, es decisiva en su discurso la concepción que muestra tener de los cuerpos en general. En efecto, el cuerpo es concebido como finito y poseedor de una cierta figura; es descrito como grande o pequeño solamente en relación con otros cuerpos; es entendido como ubicado en el espacio y en el tiempo; en movimiento o parado; solo o tangente a otros cuerpos. Como dice Galilei, «por ninguna imaginación puedo separarla de estas condiciones». [71] Las características que se atribuyen al cuerpo corresponden, como puede verse, a cualidades de tipo geométrico-matemático.

Por otra parte, si nos referimos a características como el color, el sonido, el sabor, etc., Galileo afirma que no existe ninguna razón, ninguna necesidad mental, que le obligue a considerar estas cualidades como si fueran inherentes al propio cuerpo. En cambio, sí que se lo sugieren los sentidos y no la sola y simple razón. Las cualidades mencionadas, siguiendo aún a Demócrito, son descritas como «puros nombres», [72] y el lugar en el que se sitúan se halla en el cuerpo que siente, no en el que es sentido. Se abre así el camino hacia la concepción moderna de la subjetividad, que empieza a establecerse como actividad respecto a la cual se describe el conocimiento mismo, y el color, sobre esta estela, es considerado como fantasma de los sentidos. Del mismo modo, el calor es explicado recurriendo a una hipótesis atomista. El fuego, fuente del calor, es entendido como una multitud de partículas mínimas que, una vez encuentran nuestro cuerpo, y moviéndose con gran rapidez, crean la sensación del calor. Y es la velocidad de las partículas la que hace agradable o molesta esa sensación:

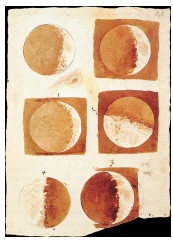
> Me inclino a creer que el calor es una de estas sensaciones, y que esas materias que producen y nos hacen sentir el calor consisten en una

> multitud de partículas mínimas configuradas de tal y cual manera, movidas con tal y cual velocidad; las cuales, al chocar con nuestro cuerpo, lo penetran debido a su suma sutilidad, y su contacto, realizado en el paso a través de nuestra sustancia, es sentido por nosotros, en la sensación que llamamos calor. [73]

En estos hechos, como ya se ha dicho, está presente de una forma muy evidente la influencia de Demócrito, mientras que en Galilei generalmente se pone de relieve la influencia platónica. En la década de 1980, en este sentido, causa sensación la interpretación de Galileo que ofrece Pietro Redondi, que hace que la condena eclesiástica se dirija no tanto al heliocentrismo, del cual, de hecho, no es ni el único ni el primer exponente, como la concepción materialístico-demócrita, que está en la base su física. [74] Según lo dicho, por lo tanto, Galilei había elaborado una física terrestre mucho antes de enfocar el telescopio hacia el cielo.

Como es comprensible y previsible, Galileo se adhiere al copernicanismo. El inicio de su aventura astronómica se produce cuando descubre que algunos ópticos flamencos han construido un telescopio; gracias a la ayuda de vidrios de Murano y a la colaboración con la Universidad de Padua, consigue fabricar un ejemplar capaz de agrandar mil veces la imagen. Cuando lo enfoca al cielo, lo hace con la actitud de un físico que estudia a través de los sentidos, ya que el telescopio no es más que una ampliación de las cualidades naturales del ser humano. En 1610, cuando escribe la *Gaceta sideral*, dedica la obra a la familia de los Médicis y anuncia el descubrimiento de los satélites de Júpiter, denominados «estrellas medíceas». Sus observaciones le permiten estudiar las manchas lunares, el aspecto descrito como «incorpóreo» de Saturno, y las fases de Venus, que resultan ser un elemento determinante a favor de la confirmación de la tesis heliocéntrica. En todo caso puede observarse cómo en la *Gaceta sideral* se reconoce una propensión hacia la teoría heliocéntrica, que, sin embargo, no desemboca en la formulación de una hipótesis clara y definitiva. La cara de Venus, como también hace la Luna, cambia su propia forma y traza fases: eso podría explicarse recurriendo a la teoría heliocéntrica, pero no a la ptolemaica, ya que, aun admitiendo los epiciclos, podríamos ver Venus reducida a un ½, pero no a ¼ como realmente ocurre. [75]

Este tipo de descubrimientos le sirve a Galileo como la demostración del venir a menos de la contraposición totalmente aristotélica entre cielo y tierra y, en consecuencia, de una unificación de la teoría física que les concierne. Las manchas lunares son explicables con el hecho de que también la superficie de los cuerpos celestes, en este caso de la Luna, presentan relieves, valles, llanuras y montañas, de las cuales Galileo realiza dibujos.



Las fases de la Luna dibujadas por Galileo en 1616.

Por todo ello, la Luna no puede ser una quintaesencia en el sentido que la física celeste le atribuye. Por otra parte, en 1613 Galileo observa la existencia de las manchas solares y demuestra que también el mundo supralunar está sujeto a las alteraciones comunes del sublunar. No sólo la Luna tiene una superficie irregular, sino también el Sol: símbolo místico de máxima perfección.

En este punto, los descubrimientos de Galileo, asociados a las respectivas tesis físicas y científicas, empiezan a ser excesivamente peligrosos para la orden eclesiástica. El físico eclesiástico calabrés Paolo Antonio Foscarini afirma que puede hablarse de una fundamental equivalencia entre la teoría heliocéntrica y la geocéntrica, especialmente desde el punto de vista del impacto respecto a las Sagradas Escrituras, y dedica su obra de 1616, en forma de carta sobre la opinión de los pitagóricos y de Copérnico acerca del movimiento de la Tierra y de la inmovilidad del Sol, «a los doctos señor Galileo Galilei y señor Johannes Kepler». [76] A pesar de esta opinión, el cardenal Belarmino, en una carta enviada a Foscarini, afirma que la hipótesis surgida del trabajo de Copérnico

puede tener un valor solamente desde el punto de vista matemático, alineándose así con todo lo que ha propuesto Osiander. El cardenal, para eliminar toda legitimidad física a la hipótesis heliocéntrica, cita algunos pasajes de la Escritura, concretamente del Libro del Eclesiastés, que imponen creer en la centralidad de la Tierra. [77]

Respecto a esta polémica, Galileo se opone a Osiander y Belarmino, afirmando en una carta a monseñor Piero Dini que la hipótesis copernicana es cierta «in rerum natura» y, por lo tanto, en las cosas naturales mismas. [78] En 1616, el Santo Oficio condenó algunas proposiciones generales, pero que aún no son propias de Galileo, afirmando una vez más que —de acuerdo con la fe y la filosofía— el Sol no puede ser inmóvil y no puede estar en el centro del cosmos; además, la Tierra no puede tener un movimiento de revolución. Menos grave, pero también condenada, es la tesis de que la Tierra tiene un movimiento de rotación sobre su propio eje. Frente a estas firmes condenas, se le abre a Galileo un rayo de esperanza, en el momento en que es elegido al solio pontificio Maffeo Barberini, que toma posesión con el nombre de Urbano VIII. A él es a quien el físico pisano le dedica *El ensayador* y obtiene el permiso de escribir los *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, obra que trataremos más adelante. La promesa que le hace consiste en exponer sus propios descubrimientos como hipótesis, sin demostrar su efectiva validez física; por tanto, sin afirmar aquella validez «in rerum natura» en la que, en cambio, él creía. Sin embargo, Galileo guarda las pruebas físicas de lo que va diciendo, y cuando en 1632 es publicado y distribuido el *Diálogo sobre los sistemas* máximos…, su efecto es demoledor. Después de leerlo no queda otra posibilidad que posicionarse del lado del sistema heliocéntrico y copernicano. Como es sabido, Galilei es condenado y forzado a abjurar en junio de 1633.

La física: descubrimientos y errores

Galileo fue desde el principio un ferviente defensor de la teoría de Copérnico y muy pronto empezó a mantener conversaciones con Kepler, quien muestra gran admiración por el trabajo desarrollado en la *Gaceta sideral.* **[79]** Sin embargo, su postura no es del todo positiva hacia él, en concreto respecto a las tesis relativas a la cinética, que no lo convencen en absoluto. La diferencia entre ambas posturas se mide por el hecho de que Galileo aún permanece, en esta materia, próximo a una concepción platónica del movimiento de rotación de los astros y dos años después del fallecimiento de Kepler llega a considerar que estos están, científicamente, un paso por detrás respecto a Copérnico. Realmente, Galileo no está interesado en ofrecer una nueva descripción matemática de las órbitas planetarias que se compare con el tiempo, la distancia y la velocidad de los cuerpos celestes. Por el contrario, su intención es ofrecer una explicación dinámica del motivo por el que las propias órbitas deben ser circulares; sobre este punto, obviamente, erra y de nuevo desemboca en una hipótesis vinculada al concepto de «movimiento natural».

Otra situación negativa de Galileo tiene que ver con la hipótesis del cosmos cerrado que de alguna manera sigue persiguiendo, a pesar de que en el *Diálogo* parece optar por dejar a un lado la cuestión:

> Grandísima me parece la inepcia de aquellos que querrían que Dios hubiese hecho el Universo más proporcionado a la pequeña capacidad de su razonamiento, que a la inmensa, o mejor aún infinita, potencia Suya. **[80]**

Respecto a los autores que hemos visto, especialmente Bruno, no se pronuncia ni siquiera sobre la naturaleza de la materia presente en el universo, pero niega la existencia de las esferas celestes perfectas. En cuanto a las estrellas fijas, niega la tesis aristotélica basándose en consideraciones experimentales que demuestran una

distancia variable entre las estrellas, sin llegar en ningún caso a extraer conclusiones fundamentales de esta revisión. Sus afirmaciones respecto a la finitud del espacio y en relación con las estrellas fijas son bastante ambiguas, y los motivos pueden ser analizados sólo de forma hipotética: se puede creer que no le interesa demasiado la cuestión, se puede imaginar que no ha llegado a una certeza tal que le permita formular una tesis clara e incluso se puede suponer que elude el argumento por prudencia.

En cuanto a la rotación terrestre, comete un error que se hace famoso: atribuye precisamente a este movimiento el fenómeno de las mareas, cuyo origen sabemos que era totalmente otro. Kepler ya ha explicado los cambios del nivel del mar basándose en la atracción de los cuerpos celestes, mientras que Galilei está convencido de que hay que atribuirlo a las sacudidas que sufre la Tierra en la composición de sus distintos movimientos. En realidad, esta hipótesis se expone incluso a mostrar su lado débil a la crítica de tipo ptolemaica, ya que podría decirse que, si fuese así, entonces el agua del mar (como el aire) debería quedarse atrás respecto a la rotación.

La física de Galileo a menudo se presenta de una forma excesivamente triunfalista, pero no se puede omitir que alberga notables tensiones internas que no le permiten apartarse del aristotelismo sin enfrentarse a la crítica. A principios del siglo pasado se abre un debate sobre el valor real de los descubrimientos de Galileo, respecto a los cuales resulta difícil identificar los elementos de real desavenencia epistemológica y aquellos de continuidad tradicional. Los críticos de mayor autoridad de Galileo, como por ejemplo Koyré, afirman que en realidad las ideas físicas de Galileo no derivan de la experiencia, a pesar de los lugares comunes historiográficos. **[81]**

Como ya hemos visto, también el célebre epistemólogo e historiador de la ciencia Paul K. Feyerabend, en un fragmento conocido de su *Contra el método*, afirma que el modelo aristotélico debe ser más acorde con la experiencia que el galileano. Estos autores tienen la impresión de que Galileo ha conseguido hacer una genial reconstrucción de la realidad empírica, pero a partir de un

«real ideal» cuyo modelo quizá pueda hallarse en el platonismo.

Son dos los conceptos fundamentales introducidos por la física galileana, y están relacionados con la inercia y la caída de los cuerpos. Ambos, como veremos, contienen errores, concretamente en cuanto a la inercia, y su relevancia solo tendrá plena vigencia después de Newton. La inercia está conectada directamente con el primer principio de la dinámica, según cuya definición actual todo cuerpo persiste en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. En este sentido, Galileo niega que un cuerpo pueda tener un movimiento rectilíneo uniforme y lo hace siguiendo un ejemplo aristotélico. Lo que describe es un movimiento hacia el infinito y, en consecuencia, imposible: como escribe en el *Diálogo*, «la naturaleza no se mueve hacia donde es imposible llegar». **[82]** Por lo tanto, formula una concepción del movimiento inercial, pero circular, mientras que para la física moderna un movimiento circular es siempre un movimiento vinculado y, por lo tanto, no libre.

La idea de Galileo es negar valor a la hipótesis de Aristóteles sobre la división entre movimientos violentos y movimientos naturales, que a su modo de ver no incluye de ninguna manera la verdadera esencia del movimiento. Con tal objetivo, se propone encontrar una explicación para el movimiento que no lo describa ni como natural ni como violento y que, por tanto, no dependa ni de la naturaleza intrínseca de lo que es movido (movimiento naturalmente cualitativo), ni sólo de la aplicación de una fuerza externa. Si teorizamos sobre una esfera en el centro del universo que rota sobre su propio eje, este movimiento no sería ni natural ni violento. De hecho, la esfera no tiende por esencia al movimiento de rotación, ni tiene la constricción a alejarse de su lugar (según la definición del movimiento violento). Según un método típico de Galileo, hecha esta suposición, formula otra. Si una esfera rueda sobre un plano horizontal, entonces su movimiento no será igualmente ni natural ni violento, ya que no se levanta ni se baja. Si el plano fuera totalmente liso, entonces la esfera no debería pararse nunca. Pero un plano infinito semejante es inimaginable, a menos que se piense en un cuerpo que corre sobre la superficie terrestre, pero que, como es obvio, presenta condiciones de fricción.

Lo que le interesa a Galileo es confirmar la naturalidad del movimiento circular, pero al mismo tiempo quiere eliminar de esta visión toda configuración mística, que aún permanece en la física aristotélica. Respecto al plano inclinado que es finito, el círculo tiene la ventaja de no implicar ninguna fuerza que haga alejar o acercar al centro el objeto que se mueve, y esta idea deriva del hecho de que en su visión el espacio no está compuesto por planos rectilíneos, sino que es curvo, por lo que la presencia del centro es fundamental para explicar los movimientos.

Para defenderse de los ataques procedentes del entorno aristotélico-ptolemaico, Galilei recurre a los ejemplos de Giordano Bruno y cita también su experimento de la nave: el cuerpo, tanto si la nave se mueve como si no, siempre cae sobre su propia vertical. En el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo…*, Salviati expone este ejemplo y Simplicio, que defiende la visión de lo aristotélico, pide una prueba experimental; sin embargo, Galilei demuestra que en este caso es suficiente detenerse en el razonamiento lógico. En el diálogo, el modelo es el de la pregunta y respuesta, lo cual evoca fácilmente a los escritos de Platón y la mayéutica socrática. En este sentido, el galileano Salviati se expresa según una necesidad racional. De hecho, para Galileo el problema es totalmente racional: se trata de comprender cuál es la naturaleza del movimiento y, por lo tanto, no tiene nada que ver con la naturaleza de los objetos que son movidos. Para Aristóteles, en cambio, el movimiento es siempre una cuestión de pasar de la potencia al acto y, por tanto, de una realización de potencialidades intrínsecas al cuerpo.

Por el contrario, Galileo concibe el movimiento, siempre en concordancia con el discurso relativista de Bruno, no como relativo a la esencia del cuerpo, sino como relación entre un objeto y el otro. Eso significa que podemos hablar de movimiento sólo poniendo en relación el elemento móvil con otros objetos que están exentos de movimiento; una nave, por ejemplo, se muestra en movimiento sólo porque sus puntos de referencia (la costa, las islas) están inmóviles; del mismo modo, si pensamos en la carga de la nave, la consideramos parada, a pesar de que se encuentra sobre un objeto que, en cambio, consideramos en movimiento. Estos

progresos son propios también de la formulación de Bruno, quien, sin embargo, no había explotado el análisis hasta preguntarse su origen y sus motivos. En el intento por formular su principio de inercia, Galileo sí realiza este paso, y ofrece motivos que se mantienen en la argumentación sobre la relatividad del movimiento.

Para llegar al fondo de la cuestión se refiere al conocido experimento del plano inclinado descrito en los *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, publicado en 1638.[83] Dicho experimento consiste en lo siguiente: si ponemos una esfera sobre un plano liso e inclinado, la esfera viaja hacia abajo y la aceleración de su movimiento aumenta proporcionalmente al nivel de la pendiente; para moverse hacia arriba, en cambio, necesita un impulso externo, por lo tanto, no puede realizar ese movimiento de forma espontánea. En el primer caso se trataría de un movimiento natural; en el segundo, de un movimiento violento, según el léxico tradicional. Si en cambio teorizamos sobre una superficie, ni descendente ni ascendente, no hallamos ninguna propensión al movimiento. Pero si la esfera se dejara con cierto impulso (pensemos en una bola sobre un campo), no se produciría ninguna aceleración, y en condiciones ideales el movimiento duraría tanto como la longitud del plano y sería, por tanto, eterno en el caso de una superficie infinita: ni acelerado ni desacelerado. Aquí Galilei está muy cerca de la formulación del principio de inercia. Por lo tanto, en ausencia de fricción el movimiento se mantiene una vez que le es impreso al cuerpo. Como se ha dicho, eso sucedería en un sistema infinito, pero como hemos visto Galileo lo excluye. Solamente la circularidad, la presencia de un centro y, por lo tanto, la rotación alrededor de un centro gravitacional garantiza esa posibilidad. Aunque limitado a este tipo de movimiento, se establece el principio de inercia en todos los sentidos.

Las implicaciones para el paradigma científico son considerables. Debido a este principio, cuando se habla del movimiento ya no tiene que ver con una *vis*, una fuerza sustancial, que se degrada a medida que prosigue su acción, sino de un algo que actúa indefinidamente sobre el cuerpo, permaneciendo

indiferente a él hasta que no intervienen razones para detenerlo. En este sentido, pese a no formular el principio de composición de las fuerzas, el cuerpo puede participar simultáneamente en más movimientos; siguiendo este conjunto de ideas, Galileo describe de forma cinemáticamente correcta la trayectoria del proyectil como una parábola.

Al sintetizar el pensamiento de Galileo, Koyré describe su relación con el panorama que lo rodea:[84] Copérnico establece un cambio fundamental en el momento en que deja atrás el aristotelismo cuantitativo y afirma que el movimiento de la Tierra es afín al de los cuerpos que se encuentran sobre ella. Por esta vía, se pueden considerar los cuerpos como algo que participa en el movimiento terrestre sin tener que participar por ello en su naturaleza. Pero para Galileo, el movimiento circular deja de tener un significado sustancial, si bien representa el plano sobre el cual se realiza el principio de inercia, en el que todos los puntos son equidistantes del centro. El movimiento, una vez impreso, se conserva sobre el cuerpo, pero no por una causa, sino simplemente por la no interferencia de causas externas que modifiquen el movimiento inercial. Un movimiento de este tipo no está, por tanto, sujeto a fuerzas y equivale a lo que en la física aristotélica era el movimiento natural.

El segundo tema que hemos mencionado está relacionado con la caída libre de los cuerpos. La intuición de Galileo procede del hecho de que la caída de los cuerpos presenta una velocidad variable en función del tiempo, aunque inicialmente había hablado del espacio, para luego autocorregirse. El cuerpo, por lo tanto, se mueve de forma uniformemente acelerada y eso significa que en tiempos iguales consigue, a partir de la quietud, incrementos iguales de velocidad. Si bien la aceleración del cuerpo no es un descubrimiento suyo, Galileo consigue abordar una serie de problemas que surgen en relación con este.

Cuestiones matemáticas

Galileo se da cuenta de que en este marco es preciso dar con una magnitud que aumente infinitamente mediante incrementos infinitesimales. Eso significa que en ningún punto del movimiento del cuerpo el incremento de velocidad puede ser considerado nulo; existe siempre un *quantum* de aceleración en todo punto en el que el cuerpo se encuentra en el propio recorrido descendente (o bien de desaceleración en su recorrido ascendente). ¿Cómo es posible alcanzar una cantidad finita de velocidad sumando infinitas magnitudes? En este episodio se percibe la reanudación galileana de la paradoja de Zenón de Elea, denominada paradoja de Aquiles y la tortuga, o de la flecha, variante a su vez de la paradoja más conocida como paradoja sorites o del montón de arena. Una piedra que se deja ir cae cada vez con mayor velocidad, por eso su velocidad es aumentable o reducible hasta el infinito, mientras que la quietud es denominada por Galileo *tardità infinita*.[85] Antes de alcanzar una cierta velocidad, el cuerpo habrá recorrido todos los infinitos incrementos intermedios. Lo mismo sirve si pensamos en un cuerpo arrojado hacia arriba, que en este caso alcanza un estado de quietud. Pero si los grados son infinitos, de acuerdo con la paradoja de Zenón, la quietud no debería nunca ser alcanzada, a pesar de que este razonamiento infrinja la experiencia más común. Galileo se limita a plantear el problema sin llegar a resolverlo: de hecho, para resolver esto desde el punto de vista matemático habría que recurrir al cálculo infinitesimal y al relativo concepto de límite que demostrarían posteriormente Newton y Leibniz.

Cuestiones físicas

Galileo en su discurso excluye la cuestión de la *gravitas*, porque considera que no puede dar una respuesta física a ese tipo de aceleración. Como hemos visto, se han dado varias respuestas al problema, a partir de las de Gilbert y Kepler, que hacen referencia al magnetismo. En cambio, Galilei considera que debe ajustarse a los aspectos descriptivos, sin hacer hipótesis al respecto. En *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, el personaje de Salvati, que representa a Galileo, dice que no es conveniente «en el tiempo presente» buscar la causa concreta de la aceleración de gravedad, entendida como natural. En el pasado se habían dado distintas explicaciones que recurrían a la disminución o a los aplastamientos del medio sobre el que se encontraba el cuerpo. Pero Galileo las considera fantasías gratuitas. Por ahora, podría decirse que Dios intenta demostrar solamente que la aceleración existe, y nos permite describirla.

Giovanni Francesco Buonamici, de quien Galilei era discípulo, en su *De motu* define la forma como algo que da al objeto una propensión a moverse hacia un lugar. El objeto, en realidad, no posee en sí mismo esa propensión, no la posee de forma natural, puesto que el movimiento no implica un perfeccionamiento del cuerpo. Pero para Galilei esa definición no puede aplicarse a la gravedad y parece más bien un síntoma de la antigua cuestión del movimiento violento. De entre las varias opciones, existe también la física del *ímpetus*; sin embargo, emplear un término como ese amenaza con entregarse a una concepción mágica del movimiento de los cuerpos. Leonardo da Vinci, en *Los secretos del Códice Atlántico*, define la fuerza como una «virtud espiritual, una potencia invisible que por medio de una violencia accidental exterior es producida por el movimiento y colocada e infundida en los cuerpos que se encuentran sacados y desviados de su estado natural [la quietud]».[86] Pero en ambos casos el concepto de fuerza está vinculado al de movimiento violento, y por eso Galileo

no puede tenerlos en consideración para su explicación de la gravedad.

En su concepción, la caída está determinada por el peso. El peso hace que el cuerpo tienda hacia el centro, es decir, hacia el punto que neutraliza mayormente el movimiento, a pesar de que Galileo elimine toda característica sustancial, cualitativa y mística a este concepto. Cuando se pregunta el motivo por el que caen los cuerpos, se responde que con toda certeza ha gustado así a la Divina Providencia, y considera la gravedad como un fenómeno que hay que describir, como una ley natural, más allá de la cual no se puede seguir indagando:

> Y la gravedad, ¿qué es? Una cierta apetencia natural dada por la Providencia Divina a las partes para reencontrarse en su unidad e integridad, reuniéndose en forma de globo. Es esta apetencia la que mantiene en su redondez también al Sol, a la Luna y a las estrellas errantes. **[87]**

De tal modo, Galileo intenta dar al concepto aristotélico un peso y un contenido naturales. Podemos limitarnos a teorizar a través de la razón que los cuerpos más pesados son también aquellos más cercanos al centro, puesto que son más pesadas aquellas cosas que, en un espacio reducido, contienen más materia. Por lo tanto, la pesadez, que para Aristóteles constituye una *qualitas*, en la explicación de Galileo resulta una cantidad, precisamente según una concepción que parece insinuar el concepto moderno de masa, que dice que un cuerpo tiende a ir a un lugar en el que la materia está más concentrada. Pero Galileo no se ve presionado a desarrollar estas hipótesis y su noción cuantitativa de la *gravitas* implica una distinción entre materia y espacialidad que deriva del legado atomista (cabe recordar el discurso en torno al vacío). El hecho de que Galileo desee con total evidencia introducir un concepto de fuerza para explicar la gravedad hace pensar que en realidad deseaba que en un futuro se descubriera su causa.

En *Diálogo sobre los dos máximos sistemas…*, Galileo dice que la causa que mueve la Tierra es análoga a aquellas que hacen mover los otros planetas y también, quizá, la esfera estelar. Simplicio, el

aristotélico del diálogo, dice que la causa de la caída de los cuerpos es su *gravitas*, concepto respecto al cual Galileo se muestra totalmente en desacuerdo. En efecto, en el momento en que se habla de *gravitas* se limita a utilizar un nombre, sin que se haya encontrado una causa real. Según la perspectiva aristotélica, los astros son movidos por aquellas que se consideran inteligencias celestes, lo cual combina bien con la doctrina eclesiástica. A esta postura, Galileo objeta que en su explicación los seguidores de Aristóteles utilizan tres términos distintos para explicar un único concepto, que en realidad es el mismo. Concretamente son los términos *gravitas*, inteligencia y virtud impresa en el cuerpo. Lo que hay que conseguir es unificar estos términos bajo una única categoría intelectual y explicativa.

Respecto a los descubrimientos que Galileo va haciendo, existe una fuerte incompatibilidad entre el concepto de aceleración y la física escolástica tradicional. En efecto, según el modelo sedimentado, por cada causa constante hay siempre un efecto constante, y sobre esta base Aristóteles defiende que cada cuerpo tiene su propia velocidad, que depende directamente del peso, de modo que se elimina todo lo que Galileo ha afirmado. En los *Diálogos*, este último expone su propia teoría al respecto. El problema que debe resolver concierne al hecho de que, aparentemente, su modelo es totalmente desordenado, en virtud de su concepción de la aceleración. Para ordenarlo, cosa que Galileo, como buen platonista, quiere hacer en todo caso, es suficiente considerar como criterio de uniformidad no la velocidad del cuerpo, sino su incremento y, por lo tanto, la aceleración. La aceleración es, pues, constante y no varía en relación con el peso. Donde actúa el peso, el movimiento no se muestra uniforme, sino uniformemente acelerado. Según una formulación concisa: en tiempos iguales se han agregado iguales momentos y grados de velocidad, que ya no dependen, por tanto, cualitativamente de la *gravitas*. Asimismo se halla una relación ordenada entre incremento y velocidad.

Las categorías que Galileo pone en relación entre ellas son velocidad, espacio y tiempo, cuyas relaciones repiten fielmente las proporciones numéricas, dado que busca proporciones que sean

explicables gracias a las matemáticas elementales. Sin volver sobre la demostración matemática, basta recordar la formulación galileana del movimiento uniformemente acelerado: en un movimiento de este tipo, los espacios recorridos están relacionados entre sí como lo están también los cuadrados de los tiempos:

$$S = \frac{1}{2} at^2$$

Lo importante es que Galileo se preocupa, en ese caso, de hallar relaciones constantes para magnitudes variables. En el paradigma físico, lo que cambia es, por tanto, precisamente este aspecto: el elemento constante se desplaza de las magnitudes a las relaciones, o sea de la cualidad de las fuerzas a la cantidad de su medición. Se llega a esta concepción confutando de forma racional, casi al modo de un diálogo platónico, la teoría aristotélica de la caída de los cuerpos (que, justamente, no admitía variaciones en lo que consideraba como cualitativo: la fuerza) y a través de una noción demócrita del espacio, que por eso concebía una diferencia de este debido a la materia.

Calidad y cantidad: espacio, materia

En relación con estos problemas, en el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas*… parte del dilema que se cuestiona si el movimiento presupone o no el vacío, y se refiere de forma evidente a la antigua disputa entre Aristóteles y Demócrito. Simplicio, que, como sabemos, representa la parte de lo aristotélico, habla del estagirita como de aquel que ha confutado la teoría demócrita del espacio vacuo, mientras que Galileo muestra personificar las defensas del pensador atomista. **[88]** Las condiciones establecidas por Aristóteles decían que la velocidad depende de la pesadez del cuerpo y de la densidad del medio en cuyo interior se mueve. Estas condiciones derivan de sus experimentos sobre los cuerpos, los cuales determinaban que la velocidad dependía proporcionalmente del peso, en igualdad de medio. Pero en el diálogo el personaje de Sagredo —o sea, el hombre de sentido común, el que representa la parte del público— plantea una serie de objeciones. En concreto, objeta que Aristóteles nunca había demostrado que dos piedras de peso 1 a 10 no caen a velocidades 10 veces distintas. A dicha objeción, Simplicio responde a través del principio de autoridad. Aristóteles dice «veamos», por lo que podemos suponer que lo ha experimentado realmente. Pero Sagredo ha realizado realmente el experimento y ha descubierto que una bala de artillería de 100 libras, al caer, no adelanta a la bala de mosquetón. **[89]**

Pero si, como observa Simplicio, ponemos el ejemplo de móviles de peso distinto que caen en el mismo medio y móviles de mismo peso en medios distintos, en términos estrictamente galileanos, el experimento de Sagredo no demuestra nada.

Aquí interviene Salviati, el galileano, y sugiere que se debe empezar razonando, sin necesidad de recurrir a la demostración experimental, afirmando que los principios aristotélicos muestran su autocontradictoriedad. Para Aristóteles, todo cuerpo muestra una propia velocidad (natural) que puede ser alterada solamente si interviene un movimiento violento. Por eso, únicamente causas

externas podrían variar este estado que depende de la *gravitas* del cuerpo. En cambio, Salviati argumenta que móviles de velocidad diversa, si se unieran formando un conjunto, caerían a una velocidad intermedia. Pero si una piedra viaja a una cierta velocidad, pongamos $v = 8$, y otra a $v = 4$, una vez unidas obtendrán en conjunto una velocidad intermedia. Globalmente, el peso de ambas piedras —que aristotélicamente es proporcional a la velocidad— es 12. De ahí surge un problema: ¿cómo consigue un cuerpo de peso 12 moverse más lentamente que un cuerpo de peso 8? Se caería en una paradoja si se partiera del principio según el cual la velocidad varía en función del peso.

De ese modo, Galileo demuestra los límites de la concepción cualitativa de la *gravitas*. Si nos basamos en este razonamiento, la velocidad no puede ser proporcional al peso del cuerpo si ocurre en el mismo medio. Pero lo que le interesa a Galileo es establecer también la equiaceleración, y llega a ella confutando el segundo principio aristotélico, de modo que rebate a Aristóteles a partir de sus propias categorías. Respecto a la velocidad de un mismo móvil en medios distintos, argumenta que la velocidad depende del medio. Galileo está de acuerdo, pero en su opinión, esta no es más que la confutación de la primera parte de la teoría. Si dos medios tienen, pongamos, densidad 1:10, para Aristóteles la velocidad del cuerpo deberá ser proporcional y, por tanto, 10:1. Precisamente en estos términos, se negaba la existencia del vacío, porque en el vacío no existiría ninguna resistencia y la velocidad de caída sería instantánea, puesto que un valor sería 0. Justamente en virtud del movimiento, deberíamos negar el vacío. El galileano Salviati argumenta que dicho planteamiento no niega el vacío, sino la imposibilidad del movimiento en el vacío.

Pero por el momento, puesto que todavía no existían las bombas de vacío, Galileo debe proceder por hipótesis. Si suponemos la existencia del vacío, de él deducimos que en una caída al vacío, o sea, en condición exenta de medio, esto no anula la velocidad, sino que las iguala. Eso significa que, en el vacío, cada cuerpo tendría la misma aceleración. Una vez hechas estas consideraciones, y unidas a la idea galileana de una física ideal, a partir de ese momento el

estudio del movimiento más bien se presupone en el vacío, del cual es calculada la resistencia en la que, en realidad, ocurre. Experimentalmente, la ausencia de medio todavía no había sido efectuada, por lo que la vía hipotética de Galileo debe seguir —siempre por medio de la razón— dentro de medios cada vez más sutiles. En un medio sin resistencia, o en cualquier caso con una resistencia gradualmente menor, la diversidad de velocidad de dos cuerpos de peso distinto debe tender a anularse. Por lo tanto, legítimamente podemos suponer que, en el vacío, las velocidades de caída son iguales. Así, en un experimento de caída de dos cuerpos del mismo volumen, desde la misma altura y con peso totalmente distinto, la diferencia de velocidad depende únicamente del medio y de su resistencia.

Sin embargo, en esta reinterpretación del movimiento, Galileo se mantiene a caballo entre la concepción aristotélica y su superación. Por una parte, sostiene la *gravitas* como causa del movimiento de caída, mientras que, por la otra, la entiende como propiedad geométrico-cuantitativa del cuerpo, determinada por su distancia respecto al centro de la Tierra. En su plano inclinado, la aceleración de caída del cuerpo es igual a la que habría adquirido el cuerpo en la caída vertical y, por eso, depende exclusivamente de la distancia respecto al centro. Si miramos el globo terráqueo en su conjunto e imaginamos esferas equidistantes del centro, todos los cuerpos que parten de la misma esfera adquieren una misma aceleración.

Por tanto, Galileo reduce el movimiento a dos únicos movimientos:

- el movimiento inercial, que es equiacelerado y es tal solamente si no existen variaciones de distancia respecto al centro;
- la caída acelerada, cuyas variaciones de velocidad dependen sólo de la proximidad al centro.

Al problema del vacío, Galileo le da una connotación de tipo físico. La primera «jornada» de los *Diálogos* trata precisamente del vacío, partiendo del problema de la resistencia de las máquinas. Se

dice que una máquina es tanto menos resistente cuanto más grande es; por tanto, la resistencia del material es inversamente proporcional a su dimensión. Galilei afirma que también la denominada «máquina animal» (término que después adoptará Descartes) sigue los mismos criterios y sería también este el motivo por el que en la naturaleza no existen animales gigantescos. **[90]** También en el caso de la resistencia, como en de la *gravitas*, Galileo muestra tener un concepto totalmente cuantitativo de la cuestión. En efecto, la resistencia es una cantidad plenamente conectada a la estructura atómica de su materia. Por eso, un cuerpo es tanto más «fuerte» cuanto mayor es la «fuerza del vacío», o sea, cuanto más extenso es el vacío existente entre los átomos, ya que el vacío actúa en cierto modo como «bomba», tanto más enérgica cuanto más cercanos están los átomos (el término «fuerza» aquí, conviene recordarlo, es utilizado en sentido antropomórfico); por consiguiente, la gravedad viene dada por la densidad de la materia en un volumen concreto.

El recurso galileano al atomismo tiene, a menudo, el sentido de una revisión de las relaciones; de hecho, recurrir a la tradición de Demócrito sirve como forma de transformar una relación cualitativa en una relación cuantitativa. Pero su concepción atomista, como ya se ha mencionado, no está totalmente clara. También en este caso puede deberse a una cierta prudencia, ya que el atomismo era considerado tradicionalmente como un terreno inestable y peligroso. Su oscilación entre una interpretación de mínimos de inspiración anaxagórica y aristotélica, y un empuje atomista-cuantitativo también puede ser interpretado así; como alternativa puede atribuirse al enfoque revolucionario de Galileo al expresarse claramente sobre cuestiones de tintes excesivamente metafísicos. Para explicar las distintas sensaciones, habla de «mínimos cuánticos», como si los sentidos fueran golpeados por átomos procedentes de distintos elementos, por los cuales se generarían el gusto, el olor, el oído, etc. Al mismo tiempo, Galileo dice que las sensaciones son simplemente puros nombres y la diferencia entre los distintos tipos de mínimos dependería, por lo tanto, de cuestiones cuantitativas, como la figura y la velocidad. Parece que considere los átomos con el mismo criterio que los puntos

matemáticos, como si fueran principios que permiten construir figuras geométricas. Los mínimos serían sucesivamente divisibles en tamaños infinitamente pequeños, que componen los átomos de luz.

En las páginas de *El ensayador* se sostiene que estos mínimos no serían la última y definitiva resolución de la materia. El único elemento que realmente está compuesto de átomos y, por lo tanto, de partículas totalmente indivisibles, sería la luz, que presenta un movimiento, una expansión y una difusión definibles como instantáneos; rigurosamente, para la física aristotélica, este punto sería totalmente inconcebible. Los átomos luminosos serían así prácticamente inmateriales y darían forma a una luz que está considerada con el mismo criterio que un espacio puramente geométrico. En estas ideas de Galileo puede vislumbrarse una concepción de tipo enérgico de la luz, ya que se trataría de redefinir su acción en vista de una materia que, de hecho, pierde la propia dimensión física ordinaria para adquirir una que tiene algo en común con la propia radiación; si la luz está hecha de átomos, esta corresponde a algo material. Por otra parte, la suya es una materialidad puramente expansiva.

En estas ideas puede percibirse el eco de algunas resonancias neoplatónicas, concretamente respecto a la física de la luz y a la hipotética idea vinculada a ella de una radiación desde un centro. De nuevo, podría reaparecer aquí la mística copernicana del Sol, que parecía totalmente superada, como también la metafísica de la luz elaborada por Roberto Grosseteste y por Bonaventura, que tuvo una cierta influencia en el estudio de la geometrización del espacio. A este respecto, Grosseteste en *De lineis* habla explícitamente de una espacialización geométrica por medio del principio de la luz. En la recuperación por parte de Galileo Galilei de estas tradiciones puede entreverse la unificación de una concepción atomista-cuantitativa y una interpretación ligada a la metafísica de la luz. Los dos modelos que al comienzo del presente libro hemos visto oponerse al aristotelismo procuran establecer un enlace extremadamente problemático y provechoso. La matematización del mundo ideal e inmaterial (la luminosidad de la geometría espacial) responde con el carácter cuantitativo del átomo material. Al elemento bruto de uno, el otro confiere orden y geometría; al

carácter abstracto e ideal del otro, el uno proporciona esa parte de realidad que permite concretarlo.

Cuestiones abiertas

El método de Galileo, como ya hemos recordado, no puede ser considerado unívoco. Sobre todo, no puede ser considerado exclusivamente experimental. En *El ensayador*, por ejemplo, se encuentra la celebérrima frase galileana según la cual el universo es un libro escrito en caracteres matemáticos:

> La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el Universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto. **[91]**

Por lo tanto, la filosofía puede entenderse solamente observando en este «libro del universo», que está escrito precisamente en el lenguaje de las matemáticas. Eso significa que el mundo no es algo perfecta y experimentalmente transparente, por lo que necesita ser interpretado a la luz de esta mirada matematizadora. Hans Blumenberg, filósofo del siglo XX, elabora en su libro *La legibilidad del mundo* (1981) una singular forma de hermenéutica denominada *metaforología*, según la cual tiende decididamente a una incompleta inteligibilidad de la naturaleza. En sus páginas se pregunta qué ha motivado a Galilei a utilizar esa metáfora. A su modo de ver, el motivo radica en el deseo galileano de definir el objeto real de la investigación filosófica y física, contraponiendo un libro (el universo) a otro libro (las Escrituras, los textos aristotélicos). Se trata de contra poner otra autoridad por el valor libresco en el «mundo de papel» de la autoridad tradicional. **[92]** Haciendo del universo un libro, Galileo habría querido acabar con aquel tipo de autoridad que aún pesaba sobre la ciencia y sobre la filosofía de su tiempo y que contraponía el mundo a los libros.

Tommaso Campanella, en su *Apología de Galileo*, escrita en la

cárcel en 1616 y sin publicar hasta 1622, retoma la metáfora del libro. Él quiere contraponer el «libro verdadero» a las «copias del libro», ya que muchos prefieren no leer la copia en la que está el real autógrafo de Dios (el mundo), y leer el libro escrito por sus ministros. [93] Aquí se percibe una postura típica del período que va del siglo XVI al XVII y que puede resumirse en la expresión «volver al original», visible también en la postura de Lutero, que invitaba a los fieles a volver a las Escrituras, sin encomendarse forzosamente a la autoridad de los ministros de la fe. La Iglesia rebate esta postura afirmando y ratificando que el verdadero libro es uno solo y es el de la Revelación. Belarmino dice al respecto que lo único factible es elaborar hipótesis matemáticas, pero no podía considerarse una naturaleza realmente matematizada. Por el contrario, Campanella cree que los libros de Dios, los auténticos, concuerdan con las matemáticas.

Siempre permaneciendo en el tema del lenguaje, Galileo está de acuerdo en reconocer que existe una divergencia lingüística. La Revelación emplea un lenguaje alegórico, cuya preocupación está más dirigida al mundo de la moral que al de las explicaciones puramente físicas. Pero el libro de la naturaleza, repite, está escrito en caracteres matemáticos, y son estos caracteres los que deben conocerse si se quiere interpretar el mundo. Estos caracteres son los descritos por Euclides en los *Elementos*, y constituyen las figuras y los sólidos de su geometría. Eso para él es el criterio de demarcación que separa una concepción científica de una no científica. Aunque sus caracteres son incompatibles con una visión actual, es importante hacer hincapié en este principio del criterio, que en el nacimiento de la ciencia moderna tiene la función de separar los discursos aceptables para la comunidad de aquellos inaceptables a la luz de elementos directamente mensurables y cuantitativos.

Vincenzo Viviani, último discípulo y primer biógrafo de Galileo, nos explica cómo este prefiere con diferencia el campo a la ciudad, y define esta última como «prisión de las ideas especulativas». [94] Su relación con la naturaleza no tiene nada que ver con las inspiraciones de un retorno participativo a sus orígenes, si bien está

bastante vinculado a un estudio de los modelos que emergen de ella. Cuando nos preguntamos por qué la inteligencia humana puede comprender los caracteres con los que Dios escribió el libro de la naturaleza, la respuesta galileana es de tipo platónico. Como está escrito en el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*…, la inteligencia del ser humano participa de lo divino. **[95]** Este tipo de discursos era practicado tanto por los platónicos como por los pitagóricos, que daban, no por casualidad, máxima importancia a las matemáticas. Puesto que poseemos una inteligencia finita, prosigue Galileo, no podemos interpretar por entero la naturaleza, pero lo poco (cuantitativamente) que conocemos de ella, lo conocemos (cualitativamente) como lo conoce Dios. De ahí deriva la idea galileana de separar entre un conocimiento «extensivo» y uno «intensivo». En cuanto a la extensión cuantitativa del número de los objetos, la inteligencia humana conoce muy poco. Respecto a la intensidad, en cambio, en relación con las proposiciones de las matemáticas y de la geometría, su certeza es idéntica a la divina. Por eso, una vez obtenido, el conocimiento matemático es totalmente cierto y definitivo:

> Tomando el entender intensivo, en cuanto tal término abarca intensivamente, o sea perfectamente alguna proposición, digo que el intelecto humano razona tan perfectamente y conoce con absoluta certeza cuantas tengan las misma natura; y así son las ciencias matemáticas puras, o sea la geometría y la aritmética, de las que el intelecto divino sabe infinitas proposiciones más, porque sabe todo, pero de las pocas entendidas por el intelecto humano creo que su conocimiento iguala al divino en su certeza objetiva, puesto que llega a comprender su necesidad, sobre la que no creo que exista seguridad mayor. **[96]**

Pero se conserva una diferencia también en el elemento intensivo, puesto que para Galileo el lado intuitivo y atemporal del conocimiento pertenece sólo a Dios, mientras que el hombre debe recurrir al tiempo y a las demostraciones.

Mediante estas observaciones, Koyré defiende que en Galileo está presente un acuerdo metafísico entre la estructura ontológica de la realidad y la estructura mental del ser humano, y que este

acuerdo se basa en premisas innatistas. El autor del libro de la naturaleza sería también el autor de nuestra razón, que introduce en ella las verdades de aquel.[97] En su libro de 1932 *The metaphysical foundations of modern Science*, Edwin Arthur Burtt pone de relieve, en cambio, una interpretación empírico-inductiva que haría de Galileo un precursor de Hobbes. Se podría considerar, tal y como dice el erudito italiano Gargani, el método galileano más bien como un método compuesto, que se basa tanto en la inducción como en la deducción. Se trata de un método que hoy podríamos definir como heurístico y resolutivo, del cual Galileo ofrece ejemplos concretos. Gargani lo describe como un retroceso en el análisis de la experiencia,[98] gracias al cual —teniendo como principio una hipótesis no demostrada— se trataría de demostrarla *a posteriori*, en el momento en que el resultado empírico tiene lugar. Así pues, esa especie de experimentos mentales a los que Galileo da vida en sus descripciones deberían asumir la función de explicar aquello que, inicialmente, ha sido teorizado a partir de una idea concreta de lo que se quiere demostrar.

La condena

Ya nos hemos referido al libro de Pietro Redondi publicado en 1983 con el título de *Galileo herético*. El volumen quiere arrojar una nueva luz sobre la condena de Galileo por parte de la Iglesia, argumentando que, más allá de la hipótesis heliocéntrica, debía de estar en juego algo totalmente distinto, que en realidad tenía que ver con la particular herejía atomista defendida por Galilei. El libro suscitó una polémica vivaz, debida entre otras cosas a la forma brillante y original que tiene el autor de explicar la historia de las ideas. De hecho, el estilo histórico-literario que se le da al volumen se ha presentado y considerado como una ruptura en las interpretaciones clásicas de Galileo, precisamente por el hecho de que concentra la atención sobre el atomismo más que sobre el copernicanismo, lo que contradice de alguna manera los propios informes del proceso de 1633.

Como hemos visto en la sección biográfica, buena parte de la polémica galileana con la Iglesia tiene como protagonistas a los miembros de la orden de los jesuitas, particularmente atentos a los problemas relativos a la naturaleza de la fe. En concreto, se pone de relieve que un documento que data de 1624 redactado por los propios religiosos de la Compañía de Jesús contiene un examen de los escritos de Galileo centrados en la física, con especial atención por *El ensayador*.[99] El documento condena de herética la posición atomista, considerada totalmente incompatible con el dogma de la Eucaristía. Eso pone de manifiesto que la aversión eclesiástica contra la doctrina de Demócrito no se debe a causas de orden general, ni a la salvaguarda de una autoridad filosófica. Es sabido que también en Aristóteles están presentes posiciones reconducibles al materialismo y precisamente por ese motivo el aristotelismo paduano cae en la herejía.

Esa época, la de los primeros treinta años del siglo XVII, coincide con una intensa actividad contrarreformista por parte de la Iglesia católica, que sobre las cuestiones de la transustanciación del alma,

central en el rito de la Eucaristía, conduce su propia batalla contra la Iglesia reformada. Los jesuitas, por lo tanto, se muestran según esta interpretación resueltamente atentos a las cuestiones que podrían poner en crisis los pilares básicos del catolicismo, más que censores del libre pensamiento por simples motivaciones vinculadas a la autoridad de la Escritura. Asimismo, como complemento, Redondi cita el hecho de que, en el siglo XVII, el problema de la Eucaristía ocupa una posición central para todas las posiciones corpusculares, como las de Descartes y Nicolas Malebranche.

El debate sobre la transustanciación es esencial a lo largo de toda la Edad Media y el debate filosófico pone su atención en ella y encuentra una resolución solamente en el hilemorfismo de santo Tomás. Como afirma el gran escolástico en referencia a la Eucaristía:

> No hay engaño alguno en este sacramento, porque los sentidos juzgan acerca de los accidentes, y estos están ahí en toda su realidad. Ahora bien, la inteligencia, cuyo objeto propio es la sustancia, es preservada del engaño por la fe. **[100]**

En *Suma teológica*, santo Tomás concibe la materia como la extensión de un cuerpo a cuya forma confiere las propiedades cualitativas. Tras la consagración, en la Eucaristía no existe ninguna coincidencia ni con la extensión del cuerpo de Cristo, como tampoco con su forma. El milagro, por lo tanto, tiene lugar, pero la hostia no adopta la extensión del cuerpo de Cristo. Las formas conservadas del pan y del vino tras la consagración son simples accidentes sin sustancia, que, en cambio, se han convertido en el cuerpo de Cristo. Estos accidentes, según santo Tomás, ya no son el signo de la sustancia. Por eso, en la Eucaristía no estamos tratando con una conversión formal, sino con una conversión de tipo sustancial, o sea con una transustanciación. Y precisamente en el clima contrarreformista del Concilio de Trento de 1545-1563 la transustanciación es erigida como dogma.

El documento de los jesuitas de 1624 compara las posiciones adoptadas por Galileo ante este dogma rastreando en sus obras de física. Se pretende ofrecer una interpretación de Galileo situándolo

entre Anaxágoras, que tenía una concepción cualitativa de los átomos, y Demócrito, que los consideraba según un modelo exclusivamente cuantitativo.[101] Galileo posee ambos aspectos y cada uno de ellos tiene una dimensión de herejía. Los mínimos en los que se resuelven los cuerpos penetran en el sujeto sensible, creando las impresiones sensibles. Los accidentes son reducidos a átomos, son puramente subjetivos y debidos a la acción de los órganos sensoriales. En este punto, resultaría difícil establecer las características de los accidentes del pan y del vino dentro del rito de la Eucaristía. Si los átomos fueran sustanciales, en el sacramento estaríamos en presencia de partes sustanciales de pan y vino, y esa visión está condenada por el Concilio de Trento, ya que la sustancia del pan y del vino se conservaría también tras la consagración. Por el contrario, si los mínimos fueran puramente cuantitativos, en el sacramento permanecerían exclusivamente las cualidades, que serían desde el principio puros nombres. Así, se conservaría la sustancia cuantitativa y no se produciría ninguna transustanciación, ya que desaparecería toda diferencia entre una hostia consagrada y una hostia desacralizada.

Si bien la tesis de Redondi, a la luz de los documentos, es desmentida, su libro pone de manifiesto un aspecto que sería un error dejar en segundo plano: Galileo en aquellos años se encuentra en el centro de una coyuntura política que para la Iglesia es muy particular y adversa, y que inevitablemente se resiente de este hecho. Galileo, y no sólo por su copernicanismo y por las evidencias que él ha constatado en apoyo a esta idea, tiene un papel decisivo en la formación de la revolución científica. Su trabajo se centra en dos elementos: el primero consiste en una superación cada vez más evidente de la física cualitativa en virtud de la cuantitativa, y el segundo es proporcionar las bases para establecer el proceso racional de la nueva ciencia. Este papel lo sitúa, por así decirlo, en una posición delicada y arriesgada. Hemos demostrado que aún quedan muchas cuestiones abiertas y hemos destacado cómo aún está por realizarse el paso decisivo. Se realizará, en breve, en la dirección de la física.

Isaac Newton

Los modelos que hemos presentado en este libro y que sirven como reacción positiva y progresiva respecto a la tradición sedimentada del aristotelismo son el platónico y matematizador, y el atomista, cuantitativo y corpuscular. De nuevo, según las palabras de Koyré, estos modelos se reconcilian finalmente en la obra de un científico que nace exactamente el mismo año en el que fallece Galileo Galilei: Isaac Newton. Como había dicho Robert Boyle, el libro de la naturaleza está escrito en caracteres corpusculares, pero, haciéndonos eco de Galileo, la síntesis que los une es una síntesis matemática, El modelo platónico y cartesiano se fusiona así con el atomista. Newton estudia en Cambridge y, cuando Londres es devastada por la peste entre 1666 y 1669, se retira a Woolsthorpe-by-Colsterworth, su pueblo natal, donde en soledad empieza a elaborar las coordenadas generales del cálculo infinitesimal. Su carrera da un giro decisivo una vez desaparece la peste, cuando, en 1669, pasa a ser profesor de matemáticas precisamente en Cambridge y poco más tarde es nombrado miembro de la Royal Society, de la que será presidente en 1723.

En 1685, ya con más de cuarenta años, empieza a redactar *Philosophiae naturalis principia mathematica*, que concluye rápidamente y con cierta premura, lo que le confiere a la obra una forma expositiva de no fácil lectura. En 1695 es nombrado director de la casa de la moneda y a continuación es dignificado y nombrado sir, el primer científico en recibir dicho título. En 1705 tiene lugar la polémica con Leibniz a propósito del descubrimiento del cálculo infinitesimal, que ambos se disputaban. Leibniz había publicado primero sus propios descubrimientos, pero es probable que Newton hubiera sido el primero en obtener el método, e incluso que se lo hubiera sugerido a su colega alemán por carta.[102] Newton era conocido por su pésimo carácter, y llegó a escribir firmas falsas en su propia defensa. Con una maniobra más bien ingenua, Leibniz

pidió que se formase un jurado de la Royal Society, del que Newton en aquel momento ya era presidente.

Sobre el papel de Newton en la revolución científica existe un cierto debate. Podríamos preguntarnos si más que un revolucionario no habría sido un espíritu de síntesis, que obtuvo resultados que provienen de otros. Bernard Cohen lo ve como una figura revolucionaria y en el libro *Revolución en la ciencia* afirma que el punto de partida de Newton está constituido por nuevos principios científicos axiomáticos.

Espacio, tiempo y movimiento

El título de la obra *Philosophiae naturalis principia mathematica* de Newton recuerda a los *Principia philosophiae* de Descartes, publicados en 1644, y Newton, al emplear estos términos para titular su libro, muestra ya la polémica en relación con la obra de Descartes. Concretamente el término *naturalis* indica la voluntad de emprender una nueva concepción de la filosofía y señala un campo más específico respecto a la pretensión especulativa de Descartes. Newton se limita al estudio de los fenómenos naturales, sin que sea necesaria una metafísica de apoyo, encaminada a la búsqueda de las cosas últimas, como, en cambio, parecía defender el filósofo francés. No es que Newton despreciase los problemas filosóficos y teológicos, sino que simplemente no los consideraba adecuados para responder a los intereses científicos que se planteaban en ese contexto. De hecho, pretendía proceder a la definición de nuevos conceptos primarios de su investigación y lo hizo siguiendo un modelo deductivo que recuerda, en los aspectos fundamentales, al procedimiento de Euclides. Primero ofrece definiciones para después proceder a las especificaciones.

La primera definición de Newton está relacionada con el concepto de masa, que parece como introducido *ex novo* en la historia del pensamiento, aunque algo similar está en fase de elaboración en esos mismos años por parte de otras fuentes. La masa corresponde a la cantidad de materia de un cuerpo: «quantitas Materias est mensura ejusdem orta ex illius Densitate & Magnitudine conjunctim» (La cantidad de materia es la medida de la misma, surgida de su densidad y magnitud conjuntamente.). **[103]** En la actualidad, la unidad de medida de la masa es el kg/masa, es decir, la cantidad de materia contenida en un dm^3 de agua destilada a 4 grados centígrados. La cantidad de materia, dice Newton, puede obtenerse por medio del producto de la densidad por el volumen. De esta manera, se relacionan el volumen de un gas y su presión.

Lo que a menudo no pone de manifiesto la tradición es que la definición newtoniana de la relación entre masa y densidad resulta problemática, puesto que Newton define la masa mediante la densidad, pero al mismo tiempo define la densidad como masa dividida entre volumen, con lo que se genera un círculo de incongruencias. Sin embargo, sí se reconoce que Newton utilizaba estas leyes en casos concretos, y que parecían funcionar correctamente.

Con tal concepción de la masa, Newton se separa definitivamente de la tradición que lo ha precedido. No sólo de la aristotélica, sino también de la cartesiana, ya que rompe de forma definitiva la identificación entre espacio y materia.

La extensión no es suficiente para establecer la cantidad de materia presente y hace referencia explícita a la teoría corpuscular. Resulta claro que existen intervalos entre las partes y no se dice que exista un hipotético medio entre ellos. A través de esta concepción de la masa es posible descomponer un cuerpo en puntos físicos, cada uno de los cuales es portador de determinadas relaciones, abstrayéndose así de cualquier forma posible de calidad. Hay partículas que pueden ser objeto de leyes físicas, pero que consideradas en su conjunto representan una cierta cantidad. Son puntos, no geométricos sino físicos.

De este modo, gracias a Newton, la unidad de la masa pasa a ser cuantificable. Si bien la cantidad de materia se conoce a través del peso del cuerpo, peso y masa no corresponden en ningún caso al mismo concepto, como puede comprobarse si pensamos en un cuerpo en el espacio.

La definición newtoniana de la masa, que se articula como «masa inercial» (suma de los puntos materiales que ofrecen resistencia al movimiento) y «masa atrayente» (suma de los puntos materiales que ejercen una fuerza sobre los puntos circundantes), es descrita, por una parte, como resistencia a los cambios de movimiento y, por la otra, como atrayente, calificando así la fuerza de atracción.

La segunda definición se refiere a la cantidad de movimiento, que, a diferencia de lo que ocurría hasta ahora, Newton convierte en calculable inmediatamente. Su medida puede obtenerse a partir del producto de la velocidad multiplicado por la cantidad de materia. El movimiento total se obtiene, así, de la suma del movimiento de cada parte individual: «quantitas motus est mensura ejusdem orta ex Velocitate et quantitate Materiæ conjunctim». **[104]**

Interesante y problemática es la tercera definición, que se refiere a la forma. Newton empieza a hablar de ella a propósito de la inercia, es decir, a propósito de ese movimiento que en realidad no está sujeto a fuerzas. **[105]**

Concibe la inercia como una *vis* ínsita, esto es, como la disposición de la materia a resistir. En consecuencia, todo cuerpo, puesto que está dotado de inercia, persistiría en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. La verdadera ley de la inercia aparece en la segunda parte de su trabajo, y respecto a ello se ha defendido que el hecho de exponerla dos veces corresponde a una postura supererogatoria por parte de Newton. **[106]** Esta podía deducirse simplemente de la segunda ley de la dinámica, por como la expone Newton. El segundo principio de la dinámica afirma que una fuerza ejercida sobre un cuerpo imprime sobre este una aceleración en la misma dirección y en el mismo sentido que la fuerza aplicada. Se expresa mediante la fórmula F = m x a (fuerza es igual a masa por aceleración). Si la aceleración es igual a 0, entonces también la fuerza es igual a 0. Este razonamiento pone de manifiesto que la inercia puede definirse como el estado de un cuerpo no sometido a fuerzas. El motivo por el que Newton habla de la inercia como de una *vis* podría buscarse en la voluntad de ofrecer conceptos intuitivos, antropomórficos, de fuerza. O bien podría considerarse el deseo de homenajear, de esa forma, la tradición de la dinámica pregalileana con fuertes tendencias animistas.

La cuarta definición tiene que ver con la *vis impressa*, el verdadero gran descubrimiento newtoniano. Se trata de una acción ejercida sobre un cuerpo con el fin de modificar su estado de

quietud o de movimiento rectilíneo uniforme: «vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum». [107] Esta fuerza tiene tres características problemáticas, puesto que: 1) es una fuerza de carácter transitorio; 2) su efecto no permanece en el cuerpo y los efectos que permanecen en él se deben a la fuerza de inercia; y 3) mientras la inercia es inherente a la masa, la *vis impressa* debe tener una causa, que puede ser de percusión, de presión, centrípeta, etc.

La quinta definición concierne a la fuerza centrípeta. Inicialmente parece considerarla como una *vis impressa*, después decide tratarla por separado. [108] Consiste en una fuerza por medio de la cual los cuerpos son atraídos, impulsados o tienden hacia un punto, por ejemplo, hacia el centro. En realidad, no es Newton quien descubre las fuerzas centrales, sino que él es el primero en describirlas en términos matemáticos. El cartesiano holandés Christiaan Huygens ya había ido en esa dirección, pero, en el momento de explicar la gravedad, vuelve a definirla como *conatus*. [109] Para Newton, la fuerza centrípeta es la causa de la transformación respecto al movimiento inercial, puesto que el movimiento circular no es importante como tal, por lo que infringe, de esta manera, el precepto galileano y echa por tierra su concepción de la inercia. Los movimientos circulares tienden a alejarse del centro, por lo que, si no existieran fuerzas centrípetas, los cuerpos escaparían de su centro con movimiento rectilíneo uniforme.

La relación que establece entre la fuerza centrípeta y la masa es masa dividido entre velocidad. Se basa, para su descripción, en el ejemplo clásico del proyectil: cuanto menor es la gravedad, o mayor es la velocidad del proyectil, tanto menos se desviará de su dirección rectilínea y más tiempo continuará el propio movimiento. La intuición es novedosa. De esta forma, Newton establece que una fuerza puede estar vinculada a otra fuerza. Si nosotros aumentáramos la velocidad del proyectil al infinito, podríamos llevarlo a realizar la vuelta entera a la Tierra, o podríamos hacerlo salir de su órbita en torno al planeta.

Estos descubrimientos asimilan, realmente y de una forma definitiva, la física terrestre a la física celeste. Para Newton son precisamente estas las razones por las que la Luna tiene su propia órbita alrededor de la Tierra. El científico no da una definición de qué es una fuerza. Pero lo que se puede decir es que realiza una reducción suya a una relación matemática. Eso podría entenderse también como un acto prudente como el de Osiander, o bien podría estar en lo correcto quien defiende que en Newton no tiene sentido distinguir entre física y matemáticas, por lo que no sería imprescindible imaginar qué es, físicamente, una fuerza.

La última parte de los *Principia* contiene un escolio en el que se discute una definición del espacio y del tiempo desde el punto de vista filosófico. La primera idea es absolutamente negativa: no podemos medir el espacio y el tiempo mediante relaciones entre cosas sensibles, a diferencia de lo que pretendían Aristóteles y Descartes. Espacio, tiempo, lugar y movimiento son conceptos intuitivos, pero se dividen en absolutos o relativos, o sea en conceptos matemáticos o conceptos del pensamiento común, que a su vez permiten distinguir medidas verdaderas y medidas aparentes. **[110]**

Por lo tanto, es necesario dar una explicación que distinga entre espacio y tiempo sensibles y espacio y tiempo absolutos:

- El tiempo absoluto, verdadero y matemático transcurre uniformemente sin ninguna relación con nada externo y corresponde al tiempo de la duración; el tiempo relativo, en cambio, es una medida sensible y externa de la duración mediante el movimiento. Como decía Aristóteles, el tiempo es «medida del movimiento». Gracias al tiempo relativo pueden medirse las horas, los días, los meses, los años, etc.

- El espacio absoluto siempre es similar a sí mismo y es inmóvil; el espacio relativo es la medida móvil respecto a los cuerpos y a su posición. Según la definición de Newton:

> El espacio absoluto, por su naturaleza sin relación a nada externo, permanece siempre igual e inmóvil; el espacio relativo es una

> dimensión móvil o medida del espacio absoluto, que nuestros sentidos definen en relación con su posición respecto a los cuerpos, y comúnmente es considerado como el espacio inmóvil; así la dimensión de un espacio subterráneo o aéreo o celeste viene determinada por su posición respecto a la Tierra. El espacio absoluto y el espacio relativo son idénticos por dimensión y especie, pero no siempre permanecen idénticos en cuanto al número. Si la Tierra, por ejemplo, se mueve, el espacio de nuestro aire, que en relación con la Tierra siempre permanece idéntico, será ahora una parte del espacio absoluto a través del cual pasa el aire, ahora otra parte de este, y así irá cambiando perpetuamente. **[111]**

Si decimos que la Tierra se mueve, nos referimos al espacio relativo de la atmósfera. Pero al mismo tiempo nos movemos también en el espacio absoluto, ya que el espacio relativo de la Tierra ocupa sucesivamente diversas porciones de espacio absoluto. Tales ideas están relacionadas con una concepción epicúrea del vacío. Sabemos que Newton había leído y comentado a Lucrecio, a pesar de que él no es para nada epicúreo. Esta interpretación tiene que ver también con el concepto newtoniano de masa, puesto que así se modifica también la noción de lugar. El lugar pierde el significado de superficie externa de los cuerpos para adoptar el de suma de lugares ocupados por cada una de las partes que lo componen.

Tanto el lugar como el movimiento se refieren a cada punto físico que constituye la masa. El movimiento del conjunto, en otras palabras, coincide con la suma de los movimientos de las partes. La distinción que hemos visto entre tiempo absoluto y tiempo relativo permite, además, precisar la distinción entre movimiento absoluto y movimiento relativo. De hecho, el primero consiste en la traslación de un cuerpo de un lugar absoluto a otro. El segundo, de un lugar relativo a otro. Como escribe Newton:

> El movimiento absoluto es la traslación del cuerpo de un lugar absoluto a un lugar absoluto, el relativo de un lugar relativo a un lugar relativo.
>
> Definimos, pues, todos los lugares a partir de las posiciones y distancias de las cosas, con respecto a cualquier cuerpo, considerado

> como inmóvil; y luego calculamos todos los movimientos con respecto a esos lugares, considerando a los cuerpos como si se desplazaran de uno de esos lugares a otros. Así, en vez de los lugares y los movimientos absolutos, empleamos los relativos, sin que esto represente ningún inconveniente en los asuntos comunes. **[112]**

También Newton retoma el ejemplo clásico de la nave: el lugar de un cuerpo embarcado en la nave corresponde, por tanto, a la parte de la bodega que este ocupa. Si el cuerpo está parado en el interior de la bodega, la suya es una quietud relativa (relativa, precisamente, al sistema-nave), mientras que la quietud puede considerarse absoluta sólo si también la nave está parada. Es obvio que el movimiento depende de varios componentes: el movimiento de la Tierra, de la nave y del propio cuerpo, todo medido dentro del espacio inmóvil y absoluto. Estas ideas representan una derrota más de la teoría sustancialista del movimiento y van en dirección a una relativización definitiva de esta.

Una concepción similar del movimiento tiene centralidad también respecto a la definición del «movimiento inercial», enunciada después como la primera de las leyes del movimiento: «un cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, a no ser que sea sometido a alguna fuerza», **[113]** cosa que aflora también en las definiciones ya mencionadas. Sólo un tiempo realmente uniforme es capaz de medir un movimiento uniforme; por el contrario, un tiempo relativo carecería de homogeneidad. Si se toma el ejemplo de los meses y los años, esta desigualdad aparece con claridad, desde el momento en que los astrónomos están obligados a recurrir a rectificaciones para componer el calendario (sobre todo en cuanto a los años bisiestos), rectificaciones que son, en todo caso, relativas al movimiento de los astros. Es posible que un movimiento que sea equitativo al tiempo absoluto no tenga ni siquiera existencia. Pese a ello, el tiempo absoluto debe ser igualmente presupuesto.

También el concepto de espacio absoluto es una presuposición del movimiento inercial, ya que sólo en el interior de este puede ser establecido que un cuerpo está realmente quieto. Con este objetivo es suficiente definir la quietud teniendo como coordenada un único

punto de ese espacio absoluto. El criterio para determinar la posición de un cuerpo en el interior del espacio absoluto sigue siendo problemático. En todo caso, para concebir el movimiento de un cuerpo sujeto a una fuerza, también ha de presuponerse el espacio absoluto. Quien al leer estas definiciones del espacio y del tiempo perciba ciertos ecos del enfoque kantiano, que considera espacio y tiempo como condiciones trascendentales del conocimiento, no irá desencaminado.

Para que se produzca el movimiento relativo de un cuerpo, es suficiente con que la fuerza sea impresa sobre los otros objetos respecto a los cuales es considerada su posición. El ejemplo del tren en la estación, en este sentido, es perfecto. Por lo tanto, observando un movimiento relativo de dos cuerpos no podemos afirmar cuál de ellos está sujeto a una fuerza, siempre y cuando no se tenga como referencia un punto que decidimos que está parado. Por eso, sólo partiendo de un espacio absoluto, es decir, sólo presuponiendo al menos su concepto, podemos distinguir varios movimientos aparentes. La absolutidad presupuesta del espacio absoluto constituye una condición para poder comprender el movimiento relativo y aparente.

Imaginemos un cubo lleno de agua atado a una cuerda enrosca da sobre sí misma. Una vez liberada de toda sujeción, la cuerda actúa como un muelle y empieza a hacer girar el cuerpo sobre sí mismo. Entonces, ¿el agua dentro del cubo se mueve o no? En el momento inicial (A), el cubo gira y el agua permanece quieta y horizontal respecto al eje de rotación. En un segundo momento (B), el agua empieza a moverse ganando velocidad y, en el momento en el que adquiere la misma aceleración que el cubo, el agua parecerá quieta respecto al recipiente. El movimiento absoluto se distingue del movimiento relativo sobre la base de que en el movimiento absoluto se desarrolla una fuerza. En el caso B, el agua tiende a subir sobre las paredes del cubo. **[114]**

Es el elemento fenoménico el que nos dice que respecto al espacio absoluto el agua ha empezado a moverse y, precisamente, sobre la base de una fuerza de alejamiento del eje del movimiento circular, denominada también fuerza centrífuga. En el caso A, el

agua no es acelerada por ninguna fuerza y, respecto a la referencia del espacio absoluto, no estaba en movimiento. Del mismo modo, en el punto máximo del movimiento absoluto (el final del caso B), el agua aparece en reposo relativo respecto al cubo. Esta fuerza no depende del movimiento del agua respecto a los cuerpos que la rodean, como pretendía, por ejemplo, Descartes. Un movimiento absoluto real no es definible según este tipo de relaciones. Por tanto, al menos uno de los movimientos que ponemos en relación debe ser absoluto. Sin embargo, Newton admite que es increíblemente complejo distinguir un movimiento real de un movimiento aparente, ya que las partes inmóviles del espacio, que servirían como puntos de referencia para el movimiento absoluto, no son sensibles a nuestros sentidos.

Pero es suficiente la definición del movimiento verdadero para que pueda conectar el movimiento con la fuerza. En el universo, según Newton, están presentes varios sistemas solares que deben encontrarse equidistantes entre sí, puesto que Dios no ha querido crear influencias gravitatorias; cada uno de los sistemas solares tiene un centro, que, como decía Kepler, no coincide con el Sol, y este centro a su vez se mueve. De tal modo nace una nueva idea de cosmología según la cual los movimientos celestes corresponden a movimientos reales, ya que tienen como única referencia para su movimiento el espacio absoluto en el tiempo absoluto.

En el libro III de los *Principia*, Newton parte de una hipótesis, que en realidad se parece más a un postulado: «el centro del sistema del mundo está en reposo». [115] Todos los astrónomos conocidos hasta ahora están de acuerdo sobre este punto. Se ha observado que este aspecto representa una petición de principio. [116] En efecto, el centro o está en reposo o se mueve con movimiento rectilíneo uniforme; pero en este segundo caso se movería el centro del mundo, lo cual es contrario a la hipótesis de partida. Sobre la base de esta hipótesis, Newton calcula las leyes de Kepler, pero sirviéndose del concepto de fuerza y, por tanto, sin necesidad de las hipótesis magnéticas del astrónomo de Praga.

En la segunda edición de los *Principia*, fechada en 1713, Newton añade un escolio general en el que se propone el objetivo

de plantear un enfoque teológico para sus doctrinas y, a este respecto, menciona el diseño de un ente inteligente y potente: «Deum verum esse vivum, intelligentem & potentem».[117] Las estrellas fijas, para él, serían centros de sistemas análogos al solar, regulados por leyes constantes válidas en todos los mundos. La distancia entre los distintos sistemas ha sido regulada de modo que anula las interferencias gravitacionales, todo el conjunto reducido en el interior de un espacio absoluto inmóvil, por lo tanto, ni en contracción ni en expansión. Dios, como sumo arquitecto, lo ha dotado de leyes que garanticen la conservación de los objetos físicos. Por lo tanto, Dios no corresponde al alma del mundo, ni a nada parecido, sino que es el Señor del universo, poniéndose en alteridad, pero en constante presencia, respecto a este. Por lo tanto, lo divino es eso que construye el espacio y el tiempo, garantizándoles existencia. En 1704 aparece el tratado de Newton titulado *Opticks*, en el que el científico profundiza muchos de los temas tratados ya en los *Principia*. Además, se detiene de nuevo en su particular concepción de Dios y en la relación que este ser eterno, poderoso y omnisciente mantiene con el espacio y el tiempo absolutos, según los cuales el espacio absoluto (creado por Dios) funcionaría como una especie de mediación entre Dios mismo y los cuerpos.[118] Como dirá Leibniz, en esta visión existe un gran riesgo de antropomorfizar a Dios. La concepción newtoniana tiene como probable fuente la corriente de los neoplatónicos de Cambridge, uno de los cuales es Henry More, cuya posición recuerda a la de Newton. Se trataría de un Dios que se concibe como centro difuso, es decir, como un centro no posicional, pero constitutivo del universo. De hecho, el centro posicional es totalmente cuantitativo, mientras que el centro divino tiene una función de cualidad respecto al libro de la naturaleza.

El descubrimiento por el cual Newton actualmente sigue siendo uno de los científicos más reconocidos de la historia, a la altura de Galileo, Einstein y Euclides, es la ley de la gravedad universal, expuesta en los *Principia*. Se trata simplemente de una síntesis de lo que se ha dicho en estas páginas, especialmente en relación con los conceptos de masa y de movimiento. En concreto, existe una anécdota que se ha hecho célebre de la mitificación del

descubrimiento newtoniano, y es el archiconocido episodio de la manzana. Richard Keesing lo describe de la siguiente manera:

> En 1666 se retiró de nuevo de Cambridge […], y mientras estaba meditando en un huerto, cayó en la cuenta de que el poder de la gravedad (que hizo caer a una manzana desde el árbol al suelo) no estaba limitada a una cierta distancia de la Tierra, sino que su poder debía de extenderse mucho más de lo que habitualmente se pensaba. ¿Por qué no tan arriba como a la Luna?, reflexionaba, y si así fuese, que influenciara a su movimiento y quizá la retuviera en su órbita, con lo cual él caía en calcular cuál sería el efecto de esa suposición. **[119]**

Esta descripción muestra de una forma bastante clara cuál es el núcleo del descubrimiento de Newton. De tal modo se responde a una doble pregunta: ¿por qué un cuerpo gira alrededor de otro? Porque se atraen recíprocamente. Y ¿por qué un cuerpo no cae sobre el otro? Porque existe un punto de equilibrio en su atracción, ya que la fuerza que los llevaría a chocar varía, según Newton, de forma inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Se trata de una fuerza calculada según los centros de gravedad de los cuerpos en cuestión, considerados a través del concepto de masa. Analizando la ley de la gravedad, uno se da cuenta de cómo funciona el método newtoniano, que posee una importancia más a nivel operativo que en su exposición enunciativa. Las fuerzas, como indica en el prefacio del libro, no corresponden a causas reales, que para nosotros permanecen oscuras; **[120]** se trata más bien de relaciones matemáticas que explican la interacción física entre los fenómenos. Pero aquí no está en juego una causa como aquellas que esperaba encontrar la metafísica tradicional y escolástica. Todas las hipótesis que el científico pone en juego para explicar esta atracción son atribuibles más bien al intento de desmarcarse de una posición absolutamente atomista y demócrita, sobre las cuales desde siempre ha pesado la acusación de ateísmo. En los *Principia* se entrevé claramente el estilo explicativo de Newton: pueden explicarse los fenómenos también sin conocer sus causas. Hemos explicado la gravedad, dice, hemos explicado las mareas, y los demás fenómenos sin recurrir a indicar sus causas: «hypotheses non fingo», no invento hipótesis. **[121]** Newton, en contra de Descartes, no admite la

posibilidad de principios que no deriven de la experiencia, ya que en el ámbito físico no se puede proceder de la abstracción hipotética y metafísica. La gravedad universal, por tanto, es un cómo, no un por qué: es una descripción física y matemática de los fenómenos, no el hallazgo de su causa objetiva y especulativa. Por consiguiente, en el libro II de los *Principia* Newton expone los principios del correcto filosofar (véase el recuadro en la página anterior), que posteriormente serán incorporados por la filosofía y la ciencia del siglo XVIII. Cuando más de un siglo después el gran astrónomo Pierre-Simon Laplace se dirige a Napoleón para presentar su propio sistema, el emperador le pregunta: «Newton ha hablado con frecuencia de Dios en su libro. Yo ya he repasado el suyo y no he encontrado mencionado Su nombre ni una sola vez». A lo que el científico respondió: «Primer cónsul, no tengo ninguna necesidad de esa hipótesis». El célebre intercambio de ocurrencias entre Napoleón y Laplace, en realidad, estaba preparado ya para el método newtoniano. Las hipótesis, que no sirven para razonar de forma descriptiva los fenómenos, son totalmente inútiles y deben evitarse.

Cuando en el segundo capítulo hemos señalado las condiciones del nacimiento de la ciencia moderna, hemos hablado de ella como la eliminación de los siguientes obstáculos:

- superación de la distinción entre una física celeste y una física terrestre y, como consecuencia, abandono de la convicción del carácter circular de los movimientos celestes;
- eliminación de la imagen de la tierra inmóvil;
- desaparición de la creencia en la finitud del universo derivada de la teoría de los lugares naturales;
- eliminación de la necesidad de encontrar una causa para el estado de quietud;
- abandono de la discrepancia entre la astronomía y las matemáticas.

Por lo tanto, podemos decir que precisamente con Newton

maduran estas condiciones. El paradigma, en definitiva, se rompe y, de hecho, puede empezar la aventura de una nueva ciencia.

Las reglas de Newton para el correcto filosofar

Regla I. No deben admitirse más causas de las cosas naturales que las que sean verdaderas y suficientes para explicar los fenómenos. Ya dicen los filósofos: la naturaleza nada hace en vano, y vano sería hacer mediante mucho lo que se puede hacer mediante poco. Pues la naturaleza es simple y no derrocha en superfluas causas.

Regla II. Por ello, en tanto que sea posible, hay que asignar las mismas causas a los efectos naturales del mismo género. Como en el caso de la respiración en el hombre y en el animal; de la caída de las piedras en Europa y en América; de la luz en el fuego de la cocina y en el Sol; de la reflexión de la luz en la Tierra y en los planetas.

Regla III. Han de considerarse cualidades de todos los cuerpos aquellas que no pueden aumentar ni disminuir, y que afectan a todos los cuerpos sobre los cuales es posible hacer experimentos, deberán ser consideradas cualidades de todos los cuerpos. Pues las cualidades de los cuerpos sólo mediante experimentos se esclarecen, y por lo mismo se han de establecer como generales cuantas cuadran generalmente con los experimentos; y aquellas que no pueden disminuir tampoco pueden ser suprimidas. Ciertamente, no hay que fantasear temerariamente sueños en contra de la seguridad de los experimentos, ni alejarse de la analogía de la naturaleza, toda vez que ella suele ser simple y congruente consigo misma. La extensión de los cuerpos no se nos revela si no es por los sentidos […]. Que todos los cuerpos son impenetrables lo inferimos no de la razón sino de la sensación. Los cuerpos que manejamos resultan ser impenetrables. […] Finalmente, si mediante experimentos y observaciones astronómicas consta que todos los cuerpos alrededor de la Tierra gravitan hacia ella, y esto según la cantidad de materia, y, viceversa, que nuestro mar gravita hacia la Luna, que todos los planetas gravitan mutuamente entre sí y que la gravedad de los cometas hacia el Sol es similar, habrá que decir, en virtud de esta regla, que todos los cuerpos gravitan entre sí. […] Sin embargo, no afirmo en absoluto que la gravedad sea esencial a los cuerpos. Por fuerza ínsita entiendo solamente la fuerza de inercia.

Esta es inmutable. La gravedad disminuye al alejarse de la Tierra.

Regla IV. Las proposiciones obtenidas por inducción a partir de los fenómenos, pese a las hipótesis contrarias, han de ser tenidas, en filosofía experimental, por verdaderas exacta o muy aproximadamente, hasta que aparezcan otros fenómenos que las hagan o más exactas o expuestas a excepciones. Debe hacerse esto para evitar que el argumento de inducción sea suprimido por las hipótesis.

I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*
Londres, 1686

APÉNDICES

Bibliografía

Fuentes antiguas

Diels, H. y Kranz, W (eds.), *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Berlín, 1952.

Aquino, T., *Suma teológica* III, trad. de Francisco Barbado, Madrid, 2010.

Aristóteles, *Acerca del cielo*, trad. de Miguel Candel, Madrid, 1996.

Aristóteles, *Categorías*, en *Obras completas*, trad. de Francisco Gallach, Madrid, 1933.

Aristóteles, *Física*, trad. de Guillermo R. de Echandía, Madrid, 1995.

Aristóteles, *Metafísica*, en *Obras completas*, trad. es. de Tomás Calvo, Madrid, 1994.

Cicerón, *Del hado*, trad. de Francisco Navarro, Madrid, 1912.

Epicuro, *Epístola a Heródoto*, en *Obras completas*, trad. de José Vara, Madrid, 2012.

Lucrecio, De *la naturaleza de las cosas*, trad. de Agustín García Calvo, Madrid, 1984.

Platón, *Fedón*, trad. de Carlos García Gual, en *Diálogos III*, Madrid, 1988.

Platón, *Fedro*, trad. de Emilio Lledó, en *Diálogos III*, Madrid, 1988.

Platón, *República*, trad. de Conrado Eggers, en *Diálogos IV*, Madrid, 1988.

Platón, *Timeo*, trad. de Francisco Lissi, en *Diálogos VI*, Madrid, 1992. Plutarco, *Sobre la cara visible de la luna*, en *Obras morales y de costumbres* IX, trad. de Vicente Ramón y Jorge Bergua, Madrid, 2002.

Fuentes modernas

Bruno, G., *De la causa, principio y uno*, trad. de Ángel Vassallo, Buenos Aires, 2011.

Bruno, G., «De somnii interpretatione», en *Due dialoghi sconosciuti e due dialoghi noti*, ed. de G. Aquilacchia, Roma, 1957.

Bruno, G., *La cena de las cenizas*, trad. de Miguel A. Granada, Madrid, 2015.

Bruno, G., *Sobre el infinito universo y los mundos*, trad. de Ángel J. Cappelletti, Buenos Aires, 1981.

Campanella, T. *Apología de Galileo*, trad. de Nicola Tudisco, Buenos Aires, 2006.

Campanella, T. «Del sentido de las cosas y de la magia», en G. Reale y D. Antiseri, *Historia del pensamiento filosófico y científico II*, trad. de Juan Andrés Iglesias, Barcelona, 1995.

Copérnico, «Al santísimo señor Pablo III, pontífice máximo», en *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes),* trad. de Carlos Mínguez, Madrid, 1982.

Copérnico, N., *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes),* trad. de Carlos Mínguez, Madrid, 1982.

Cusa, N. de, *La docta ignorancia*, trad. de Manuel Fuentes, Barcelona, 1985.

Da Vinci, L., *Los secretos del Códice Atlántico*, trad. de Antonio Díaz Pérez, Barcelona, 2012.

Galilei, G., *De mota*, en *Edizione nazionale delle opere*, vol. I, ed. de A. Favaro, Florencia, 1890.

Galilei, G., *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, trad. de Antonio Beltrán, Madrid, 2011.

Galilei, G., *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, trad. es. de José San Román, Buenos Aires, 2003.

Galilei, G., *El ensayador*, en *Galileo. Antología*, trad. de Víctor Navarro, Barcelona, 1991.

Galilei, G., *Esercitazioni filosofiche*, en *Edizione nazionale delle opere*, vol. VII, ed. de A. Favaro, Florencia, 1890.

Galilei, G., *La gaceta sideral*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 2007.

Gilbert, W., *De magnete*, Londres, 1600.

Huygens, C., *De vi centrifuga*, en *Oeuvres completes*, La Haya, 1929.

Kepler, J., *Mysterium cosmographicum*, en *Gesammelte Werke*, vol. VIII, ed. de M. Caspar, Monaco, 1937.

Kepler, J., *Astronomía nova*, en *Gesammelte Werke*, vol. III, ed. de M. Caspar, Monaco, 1937.

Newton, I., *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1686.

Newton, I., *Philosophiae naturalis principia mathematica*, 2.ª edición, Cambridge, 1713.

Newton, L, *Opticks: or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*, Londres, 1721.

Osiander, A., «Al lector con relación a las hipótesis de esta obra», prefacio de N. Copérnico, *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes),* trad. de Carlos Mínguez, Madrid, 1982.

Viviani, V, *Racconto istorico della vita del Signor Galileo Galilei*, Liber-Liber, 2002.

Estudios

Banfi, A., *Vida de Galileo Galilei*, trad. de Alberto Méndez, Madrid, 1967.

Benjamin, W., *El origen del drama barroco alemán*, trad. de José Muñoz, Madrid, 1990.

Blumenberg, H., *La legibilidad del mundo*, trad. de Pedro Madrigal,

Barcelona, 2000.

Cantelli, C. (ed.), *La disputa Leibniz-Newton sull'analisi*, Turín, 1958.

Casini, P., *El universo máquina. Orígenes de la filosofía newtoniana*, trad. de Teresa Filesi, Barcelona, 1971.

Duhem, P., *Études sur Léonard de Vinci. Ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu*, vol. II, París, 1906-1909.

Duhem, P., *To save the fenomena*, Chicago, 2015.

Feyerabend, P. K., *Tratado contra el método. Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*, trad. de Diego Ribes, Madrid, 1986.

Gargani, A., *Il sapere senza fondamenti*, Turín, 1975.

Garin, E., *Medioevo y Renacimiento*, trad. de Ricardo Potchar, Madrid. 2001.

Geymonat, L., *Ciencia y realismo*, trad. de José Francisco Ivars, Barcelona, 1980.

Geymonat, L., *Historia de la filosofía y de la ciencia*, trad. de Pere Unís Font, Barcelona, 2005.

Keesing, R. G., «The history of Newton's apple tree», en *Contemporary Physics*, 39,1998.

Koyré, A., *Del mundo cerrado al universo infinito*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 1999.

Koyré, A., *Estudios galileanos*, trad. de Mariano González Ambou, México, 2005.

Koyré, A., *La révolution astronomique*, París, 2016.

Kuhn, T., *La estructura de las revoluciones científicas*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 2006.

Losee, J., *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*, trad. de A. Montesinos, Madrid, 1976.

Mach, E., *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch*

dargestellt, Leipzig, 1883.

Marx, K., *La ideología alemana*, trad. de Wenceslao Roces, Madrid, 2014.

Mattioli, M., «Materia, minimo e misura. La genesi dell'atomismo 'geométrico' in Giordano Bruno», en *Rinascimento*, 5, 2010.

Popper, K. R., *La lógica de la investigación científica*, trad. de Víctor Sánchez de Zavala, Madrid, 1962.

Redondi, P., *Galileo herético*, trad. de Antonio Beltrán, Madrid, 1990.

Cronología

Vida y obras de Galileo Galilei	Contexto histórico-cultural
	1563. Final del Concilio de Trento.
1564. Nace el 15 de febrero en Pisa; es el mayor de siete hijos.	
	1570. Cosme I pasa a ser gran duque de Toscana.
	1571. Batalla de Lepante. Final de la expansión turca.
	1572. Francia. Masacre de los hugonotes.
1580. Ingresa en la Universidad de Pisa para estudiar medicina; pronto se interesa por las matemáticas.	
1584. Abandona los estudios de medicina y se traslada a Florencia.	
	1585. Inicio de la guerra anglo-española.
1586. Escribe *La balanza hidrostática*, tratado sobre el peso específico de los cuerpos.	
	1587. Isabel I de Inglaterra manda decapitar a su prima María Estuardo.
	1588. La Armada Invencible española es derrotada por los ingleses.
1589. Gracias al protectorado de Fernando I de Médici obtiene un contrato de tres años para la cátedra de Matemáticas en la Universidad de Pisa.	

1592. Obtiene la Cátedra de Matemáticas en la Universidad de Padua.

1596. Nacimiento de Descartes.

1597. Inicia su correspondencia con Kepler.

1598. Final de las guerras de religión de Francia.

1599. Publica *Las mecánicas*.

1603. El hijo de María Estuardo, Jacobo, sube al trono de Inglaterra.

1604. Final de la guerra anglo-española con la firma del Tratado de Londres, favorable a España.

1606. Publica *Las operaciones del compás geométrico y militar*.

1609. Kepler publica *Nueva Astronomía*.

1610. Vuelve a Florencia y dedica a Cosme II de Toscana la *Gaceta sideral*, basada en las primeras observaciones y descubrimientos realizados con el telescopio.

1612. Publica el *Discurso sobre las cosas que están sobre el agua*.

1613. La Academia Nacional de los Linces publica *Historia y demostraciones sobre las manchas solares y sus accidentes*. Escribe *Carta al padre Benedetto Castelli*.

1614. La Iglesia lo acusa de hereje. Con la sentencia del 24 de febrero de 1616 se le prohíbe enseñar, bajo pena de cárcel.

1615. En Roma publica el

Discurso sobre el flujo y el reflujo del mar. Escribe la *Carta a Cristina de Lorena*.

1616. Mueren Cervantes y Shakespeare.

1618. Sobrevuelan Europa tres cometas, uno de ellos de dimensiones gigantes. Inicio de la guerra de los Treinta Años.

1619. Escribe el *Discurso sobre cometas*.

1620. Francis Bacon publica *Novum Organum*. Los Peregrinos desembarcan en América en el barco Mayflower.

1623. Publica *El ensayador*.

1623. El cardenal Maffeo Barberini es proclamado papa con el nombre de Urbano VIII.

1626. Fallece Francis Bacon.

1628. Carlos I de Inglaterra acepta la petición de derechos promovida por el Parlamento. En Francia, el cardenal Richelieu asalta La Rochelle, la fortaleza de los calvinistas franceses.

1629. Carlos I de Inglaterra disuelve el Parlamento.

1630-1656. La peste mata a más de dos millones de personas.

1632. Publica el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*.

1633. La Iglesia lo procesa y le obliga a abjurar de sus descubrimientos. El Santo Oficio lo condena a arresto domiciliario.

1634. Escribe *Discursos y*

1634. Carlos I de Inglaterra se

demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias que se refieren a la mecánica y a los movimientos locales, publicado en los Países Bajos en 1638.

alía con España para atacar a los holandeses.

1637. Descartes publica *El discurso del método*.

1639. Inicio de la guerra civil en Escocia y en Irlanda.

1642. Aún bajo arresto, muere en su villa de Arcetri el 8 de enero.

1642. Carlos I huye a Oxford. Empieza la guerra civil inglesa. Fallece Richelieu.

Notas

[1] T. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 2006. < <

[2] K. R. Popper, *La lógica de la investigación científica*, trad. de Víctor Sánchez de Zavala, Madrid, 1962. < <

[3] T. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas, op. cit*. < <

[4] K. R. Popper, *La lógica de la investigación científica, op. cit.* <<

[5] P. K. Feyerabend, *Tratado contra el método. Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*, trad. de Diego Ribes, Madrid, 1986. < <

[6] *Ibidem*, págs. 198-199. < <

[7] T. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas, op. cit*. <<

[8] W. Benjamín, *El origen del drama barroco alemán*, trad. de José Muñoz, Madrid, 1990. < <

[9] K. Marx, *La ideología alemana*, trad. de Wenceslao Roces, Madrid, 2014. < <

[10] Sobre la relación entre crisis social y progreso científico, véase L. Geymonat, *Historia de la filosofía y de la ciencia*, trad. de Pere Lluís Font, Barcelona, 2005; en consecuencia, los medios a los que el progreso científico-técnico necesita recurrir para extirpar los males generados, dentro de esta sociedad, son muy distintos y mucho más serios que aquellos propuestos a menudo por románticos detractores de la racionalidad científica y, con ella, de todo el mundo moderno (véase L. Geymonat, *Ciencia y realismo*, trad. de José Francisco Ivars, Barcelona, 1980). < <

[11] «Es necesario que el cielo tenga forma esférica, pues esta figura es la más adecuada a la entidad [celeste] y la primera por naturaleza» (Aristóteles, *Acerca del cielo*, II (B), 3-4, 286 b, trad. de Miguel Candel, Madrid, 1996). < <

[12] «La cantidad es o bien discreta o bien continua […]; podemos poner aquí, como ejemplos de cantidades discretas, el número y la locución o frase; y de cantidades que son continuas, la línea, la superficie y el sólido, a las que se puede añadir el tiempo y el lugar» (Aristóteles, *Categorías*, 6, 4 b, en *Obras completas*, trad. de Francisco Gallach, Madrid, 1933). < <

[13] «Que no hay vacío separado, tal como algunos afirman, digámoslo de nuevo» (Aristóteles, *Física*, IV, 8, 379, trad. de Guillermo R. de Echandía, Madrid, 1995). < <

[14] Para los movimientos naturales y la relación con los cuatro elementos: Aristóteles, *Acerca del cielo* 1(A), 3, 269b-270, *op. cit.* <<

[15] *Idem.* < <

[16] Para la distinción entre los dos movimientos, véase, por ejemplo, Aristóteles, *Física*, VIII, 4, 254b-255, *op. cit.* < <

[17] Aristóteles, *Metafísica*, VIII (H), 1-2, 1042 b 11-1043 b24, págs. 373-379, trad. de Tomás Calvo, Madrid, 1994; sobre la composición cualitativa de las sustancias, VIII, (H), 4, 1044 a 25-1045 a 7, págs. 383-387. < <

[18] Sobre la doctrina de los elementos y de las raíces inmutables en Empédocles véase DK, B 7, B 17 y B 28 (*Die Fragmente der Vorsokratiker*, a cargo de H. Diels y W. Kranz, Berlín, 1952. < <

[19] «Ciertamente también hay que pensar que los átomos no poseen ninguna cualidad de las cosas visibles excepto forma, peso y tamaño y cuantas cosas son por necesidad connaturales a la forma» (Epicuro, *Epístola a Heródoto*, en *Obras completas*, trad. de José Vara, Madrid, 2012). < <

[20] «Pero no todas las cosas se mantienen juntas apretadas por cada parte de su naturaleza corpórea: existe en las cosas el vacío [*est in rebus inane*]» (Lucrecio, *De la naturaleza de las cosas*, I, 329-330, trad. de Agustín García Calvo, Madrid, 1984). < <

[21] «Declina el átomo, dice Epicuro. […] En primer lugar, ¿por qué? […] ¿Acaso se sortean para declinar unos y no declinar otros? […] Esto es cortar la cuestión y no discutirla» (Cicerón, *Del hado*, XX, 46, trad. de Francisco Navarro, Madrid, 1912). < <

[22] Véase Lucrecio, *De la naturaleza de las cosas, op. cit*, V, 431-494, págs. 359-363. < <

[23] Sobre el estudio de la filosofía natural por parte de Sócrates: «Cuando era joven estuve asombrosamente ansioso de ese saber que ahora llaman “investigación de la naturaleza”» (Platón, «Fedón», 96a, pág. 101, trad. de Carlos García Gual, en *Diálogos III*, Madrid, 1988). < <

[24] Platón, «Fedro», 230d, pág. 317, trad. de Emilio Lledó, en *Diálogos III*, Madrid, 1988. < <

[25] Sobre la relación entre filósofos y filodoxos, entre ciencia natural y filosofía, entre verdad y opinión, véase Platón, «República», 475e-480a, págs. 286-294, trad. de Conrado Eggers, en *Diálogos IV*, Madrid, 1988. < <

[26] «Cuando su padre y progenitor vio que el universo se movía y vivía como imagen generada de los dioses eternos […]. Entonces, como este es un ser viviente eterno, intentó que este mundo lo fuera también en lo posible» (Platón, *Timeo*, 37c-d, pág. 182, trad. de Francisco Lissi, en *Diálogos* V7, Madrid, 1992). < <

[27] *Idem*, 57e-58c, págs. 213-214. < <

[28] *Ibidem.* < <

[29] Plutarco, *Sobre la cara de la luna*, 925d-926c, págs. 146-149, en *Obras Morales y de costumbres IX*, trad. de Vicente Ramón y Jorge Bergua, Madrid, 2002. < <

[30] Sobre la tradición de salvar los fenómenos y en general sobre todo lo dicho respecto a Ptolomeo, véase J. Losee, *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*, trad. de A. Montesinos, Madrid, 1981. < <

[31] Sobre la influencia de los sabios bizantinos y la importancia del trabajo de Ficino, véase E. Garin, *L'umanesimo italiano*, Roma-Bari, 1964, págs. 97-100 y págs. 105-112. < <

[32] Sobre esto y, en general, sobre el hermetismo entre los siglos III y XVI, véase E. Garin, *Ermetismo del rinascimento italiano*, Roma, 1988, en concreto sobre Hermes y Egipto, págs. 21-32. < <

[33] «El posicionamiento de magos, alquimistas, paracelsianos y seguidores del hermetismo ejerció sin duda un peso notable sobre la penetración, en el mundo de la cultura, de una nueva forma de considerar la “práctica”, el “hacer” las “operaciones”» (P. Rossi, *Il tempo dei maghi. Rinascimento e modernitá*, Milán, 2006, pág. 278). < <

[34] En el clásico P. Duhem, *Études sur Léonard de Vinci. Ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu*, vol. II, París, 1906-1909, véanse algunas alusiones en P. Duhem, *To save the phenomena*, Chicago, 2015. < <

[35] Para la formulación de este principio, véase N. de Cusa, *La docta ignorancia*, trad. de Manuel Fuentes, Barcelona, 1985. < <

[36] A este respecto, se lee: «Comparada con la profunda crítica de sus fundamentos metafísicos por parte de Nicolás de Cusa, la revolución copernicana puede parecer un tanto tímida y no muy radical» (A. Koyré, *Del mundo cerrado al universo infinito*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 1999, pág. 32). < <

[37] Sobre este asunto, véase la «Introduzione.» en P. Rossi (ed.), *La rivoluzione scientifica: da Copérnico a Newton*, Turín, 1973; para los criterios mencionados, en concreto págs. IX-X. el primer sistema solar que tiene, al menos a grandes rasgos, las características que aún hoy le otorgamos. < <

[38] N. Copérnico, *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes),* trad. de Carlos Mínguez, Madrid, 1982,1,1, pág. 15. < <

[39] *Idem*, I, IV, págs. 18-20. < <

[40] *Idem*, I, IV, págs. 18-20. < <

[41] *Idem, Al santísimo señor Pablo III, pontífice máximo*, pág. 7. <<

[42] «Tampoco pudieron hallar o calcular partiendo de ellos lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría exacta de sus partes, sino que les sucedió como si alguien tomase de diversos lugares manos, pies, cabeza y otros miembros auténticamente óptimos, pero no representativos en relación con un solo cuerpo, no correspondiéndose entre sí, de modo que con ellos se compondría más un monstruo que un hombre» (*idem*, pág. 9). < <

[43] «Y no es necesario que estas hipótesis sean verdaderas» (*Ídem*, «Al lector sobre las hipótesis de esta obra», pág. 34). < <

[44] G. Bruno, *La cena de las cenizas*, trad. de Miguel A. Granada, Madrid, 2015, pág. 112. < <

[45] N. Copérnico, *Sobre las revoluciones (de las orbes celestes), op. cit,* I, VIII, pág. 27. < <

[46] «Copérnico, como he dicho muy a menudo, y como otros han dicho mucho tiempo antes que yo, no es copernicano. Copérnico no es “moderno”» (A. Koyré, *La révolution astronomique*, París, 2016). <<

[47] «Hasta tiempos recientes generalmente se suponía que quien había dado el paso decisivo había sido Giordano Bruno» (A. Koyré, *Del mundo cerrado al universo infinito, op. cit*). < <

[48] Así, Giovanni Schiaparelli se expresa en una carta enviada al erudito Felice Tocco cuando este le pide una aclaración sobre el valor de la cosmogonía de Bruno. Tocco después publica la carta del astrónomo: F. Tocco, *Le opere latine di Giordano Bruno esposte e confrontate con le italiane*, Florencia, 1899, págs. 313-315. < <

[49] Cita a Bruno, *La cena de las cenizas, op. cit* < <

[50] *Idem*, pág. 151. < <

[51] Sobre la esfericidad de los átomos de Bruno, considerados como exentos de dimensión y cualidad, véase G. Bruno, «De somnii interpretatione», en *Due dialoghi sconosciuti*, a cargo de G. Aquilacchia, Roma, 1957, pág. 21. Sobre este tema, véase también M. Mattioli, «Materia, mínimo e misura. La genesi dell'atomismo "geométrico" in Giordano Bruno», en *Rinascimento*, 5, 2010, págs. 425-449. < <

[52] «Hay infinitas tierras, infinitos soles y un éter infinito, o, según el decir de Demócrito y Epicuro, que hay un lleno y un vacío infinitos: el uno ínsito en el otro» (G. Bruno, *Sobre el infinito universo y los mundos*, trad. de Ángel J. Cappelletti, Buenos Aires, 1981, pág. 87). < <

[53] G. Bruno, *De la causa, principio y uno*, trad. de Ángel Vassallo, Buenos Aires, 2011. < <

[54] 54 Sobre el pulso del alma del universo y sobre su relación con el movimiento, véase G. Bruno, *Sobre el infinito universo y los mundos*, trad. de Ángel J. Cappelletti, Buenos Aires, 1981. < <

[55] 55 T. Campanella, «Del sentido de las cosas y de la magia», en G. Reale y D. Antiseri, *Historia del pensamiento filosófico y científico II*, trad. de Juan Andrés Iglesias, Barcelona, 1995. < <

[56] *Idem.* < <

[57] «La Tierra mueve la Luna en virtud de la *species*, y es un cuerpo magnético; y el Sol mueve igualmente los planetas por obra de la *species* emitida por él: también el Sol es un cuerpo magnético» (J. Kepler, *Astronomía nova*, en *Gesammelte Werke*, vol. III, M. Caspar (ed.), Monaco, 1937. Para estas citas de Kepler, véase A. Koyré, *La révolution astronomique, op. cit)*. < <

[58] Sobre Bruno y Kepler: A. Koyré, *Del mundo cerrado al universo infinito, op. cit.* < <

[59] Sobre la hipótesis ptolemaica del ecuante y sus movimientos de Marte, véase J. Kepler, *Astronomia nova, op. cit*, vol. VIII, pág. 182. <<

[60] J. Kepler, *Mysterium cosmographicum*, en *Gesammelte Werke*, vol. I, M. Caspar (ed.), Monaco, 1937, pág. 129. < <

[61] E. Dijksterhuis, *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Berlín, 1956. < <

[62] W. Gilbert, *De magnete*, Londres, 1600, pág. 59. < <

[63] Para la biografía de Galileo de Viviani, es preferible citar la edición en línea de fácil acceso para el lector: V. Viviani, *Racconto istorico della vita del Sig.r Galileo Galilei*, Liber-Liber, 2002, pág. 4. < <

[64] A. Banfi, *Vida de Galileo Galilei*, trad. de Alberto Méndez, 1967. En general, para la biografía de Galileo se hace referencia a este volumen. < <

[65] G. Galilei, *Gaceta sideral*, trad. de Carlos Solís, Madrid, 2007.
<<

[66] G. Galilei, *Lettera a Belisario Virnta*, en B. Gamba y V. Viviani, *La vita ed alcune lettere familiari di Galileo Galilei*, Venecia, 1836, pág. 101. < <

[67] C. Ceccuti, «Introduzione», en *Giovanni Spadolini. Giornalista, storico* e *uomo delle istituzioni*, Roma, 2016, pág. 23. < <

[68] Sobre Benedetti y la importancia para Galileo, véase P. Pizzamiglio, *L'astrología in Italia all'epoca di Galileo Galilei (1550-1650),* Milán, 2004, págs. 108 y sig. < <

[69] G. Galilei, *De motu*, en *Edizione nazionale delle opere*, A. Favaro (ed.), Florencia, 1890, vol. 1, pág. 267. < <

[70] V. Viviani, *Racconto istorico della vita del Sig.r Galileo Galilei, op. cit.*, pág. 7. <<

[71] G. Galilei, *El ensayador*, en *Galileo. Antología*, trad. de Víctor Navarro, Barcelona, 1991. < <

[72] *Idem.* < <

[73] *Idem*, pág. 113 y sig. <<

[74] A modo de ejemplo, véase el fragmento escrito en la introducción de P. Redondi, *Galileo herético*, trad. de Antonio Beltrán, Madrid, 1990. < <

[75] Sobre Venus: G. Galilei, *La gaceta sideral, op. cit.* < <

[76] P. A. Foscarini, *Sopra l'opinione de' Pittagorici, e del Copérnico, della mobilitá della terra e stabilitá del sole, e del nuovo pittagorico sistema del mondo*, Nápoles, 1615, págs. 196-199. < <

[77] Para la carta de Belarmino, véase P. Rossi (ed.), *La rivoluzione scientifica: da Copérnico a Newton, op. cit.*, págs. 196-199. < <

[78] G. Galileo, *Lettera a Monsignor Piero Dini in Roma*, Florencia, 23 de marzo de 1615, en *Edizione nazionale delle opere, op. cit*, vol. XII. < <

[79] La carta en la que Kepler habla de la obra de Galileo en un tono elogioso está reproducida en *Grande Antología Filosófica*, Milán, 1968, vol. XII, págs. 175-179. < <

[80] G. Galilei, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, trad. de Antonio Beltrán, Madrid, 2011, pág. 321. < <

[81] Hablando de la experiencia escribe que «la física de los nominalistas parisienses —e incluso la de Aristóteles— estaba, a menudo, más próxima a ella que la de Galileo» (A. Koyré, *Estudios galileanos*, trad. de Mariano González Ambou, Madrid, 1980, pág. 3). < <

[82] G. Galilei, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano, op. cit*, pág. 69. < <

[83] G. Galilei, *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, trad. de José San Román, Buenos Aires, 2003. < <

[84] Véase, en general, el ensayo mencionado, donde a la luz del título dedicado a Galileo se analiza principalmente su contexto: A. Koyré, *Estudios galileanos, op. cit.* < <

[85] G. Galilei, *Esercitazioni filosofiche*, en *Edizione nazionale delle opere, op. cit*, vol. Vil, pág. 594. < <

[86] Leonardo da Vinci, *Los secretos del Códice Atlántico*; véase la cita en E. Garin, *Medioevo y Renacimiento*, trad. de Ricardo Potchar, Madrid, 2001. < <

[87] G. Galilei, *Lettera del padre Foscarini sopra il sistema copernicano, op. cit.*, vol. V, pág. 481. < <

[88] G. Galilei, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo…, op. cit.* < <

[89] *Ibidem.* < <

[90] G. Galilei, *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias, op. cit.* <<

[91] G. Galilei, *El ensayador, op. cit.*, págs. 62-63. < <

[92] H. Blumenberg, *La legibilidad del mundo*, trad. de Pedro Madrigal, Barcelona, 2000. < <

[93] T. Campanella, *Apología de Galileo*, trad. de Nicola Tudisco, Buenos Aires, 2006. < <

[94] V. Viviani, *Racconto istorico della vita del Sig.r Galileo Galilei, op. cit*, e. 17. < <

[95] G. Galilei, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano, op. cit.* <<

[96] *96 Ibidem.* < <

[97] A. Koyré, *Estudios galileanos, op. cit*, «Introducción». < <

[98] A. Gargani, *Il sapere senza fondamenti, op. cit.* < <

[99] El documento se encuentra reproducido en el apéndice a P. Redondi, *Galileo herético, op. cit.* < <

[100] Tomás de Aquino, *Suma teológica III*, c. 75, a. 5, trad. de Francisco Barbado, Madrid, 2010. < <

[101] P. Redondi, *Galileo herético, op. cit.* < <

[102] Véase C. Cantelli (ed.), *La disputa Leibniz-Newton sull'analisi*, Turín, 1958, págs. 200-202 y 206-207. < <

[103] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1686, pág. 8. < <

[104] *Ibidem.* < <

[105] *Idem*, págs. 8-9. < <

[106] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883. < <

[107] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica, op. cit.*, pág. 9. < <

[108] Véase *ídem*, págs. 9 y 13. < <

[109] Véase la redacción en las obras completas del manuscrito en C. Huygens, *De vi centrifuga*, en *Ouvres completes*, La Haya, 1929, vol. XVI, págs. 255-301. < <

[110] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica, op. cit.*, págs. 11-12. < <

[111] *Idem*, pág. 11. < <

[112] *Ibidem.* < <

[113] «Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare» (*ídem*, pág. 16). < <

[114] «Si pendeat situla a filo prælongo, agaturq; perpetuo in orbem donec filum a contorsione admodum rigescat, dein impleatur aqua, et una cum aqua quiescat» (*ídem*, págs. 13 y sig.). < <

[115] «Centrum Systematis Mundani quiescere» (*Ídem*, pág. 240).
< <

[116] Para un balance general sobre la concepción newtoniana del centro del universo, véase P. Casini, *El universo máquina. Orígenes de la filosofía newtoniana*, trad. de Teresa Filesi, Barcelona, 1971. <<

[117] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, 2.a edición, Cambridge, 1713, pág. 482. < <

[118] I. Newton, *Opticks: A treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, Londres, 1721, págs. 375-379. <<

[119] R. G. Keesing, «The history of Newton's apple tree», en *Contemporary Physics*, 39, 1998, págs. 377-391. < <

[120] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica, op. cit.*, pág. 5. < <

[121] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica, 2.a* edición, *op. cit*, pág. 484. < <